

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Vliv řezných parametrů na kvalitu řezu po
laserovém řezání

Influence of Cutting Parameters on Quality Cut after
Laser Cutting

Student:

Bc. Tomáš Zlámal

Vedoucí diplomové práce:

Ing.et Ing.Mgr. Jana Petřů, Ph.D

Ostrava 2011

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Zlámal**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Vliv řezných parametrů na kvalitu řezu po laserovém řezání**
Influence of Cutting Parameters on Quality Cut after Laser Cutting

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky laserového řezání.
2. Využití laserového systému při obrábění.
3. Návrh experimentu.
4. Měření a vyhodnocení dat.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, s. 150. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [3] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [4] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [5] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci, včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 23.5.2011
.....

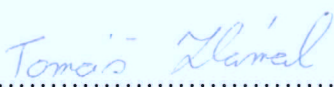
Tomáš Zlámal
.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было́ сже́днано, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было́ сже́днано, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách) ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 23.5.2011.....


.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Tomáš Zlámal

Adresa trvalého pobytu autora práce: Mišákova 453/14, Olomouc, 77900

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ZLÁMAL, T. *Vliv řezných parametrů na kvalitu řezu po laserovém řezání: diplomová práce*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011, 79 s. Vedoucí práce Petrů, J.

Diplomová práce se zabývá metodou tepelného dělení materiálu, konkrétně laserovou technologií. V teoretické části je popsán její princip, funkce, možnosti a využití laseru při obrábění, především postup řezání materiálu pomocí laserového svazku. Experimentální část je zaměřena na řezání kobaltové slitiny kontinuálním CO₂ laserem a vliv technologických parametrů při řezání na výslednou kvalitu a přesnost řezné plochy. Na základě metalografického pozorování a vyhodnocení budou stanoveny vhodné technologické parametry, při kterých je dosaženo nejvyšší kvality řezu a nejmenší tepelné ovlivnění materiálu.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

ZLÁMAL, T. *Influence of Cutting Parameters on Quality Cut after Laser Cutting: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2011, 79 p. Thesis head: Petrů, J.

This thesis deals with the method of thermal cutting of material, particularly laser technology. The theoretical part describes the principles, functions, capabilities and applications in laser machining, especially cutting process material using a laser beam. The experimental part is focused on cutting cobalt alloy with continuous CO₂ laser and the influence of technological parameters on the resulting cutting quality and accuracy of cutting surface. Metallographic observation and assessment will identify suitable technological parameters to achieve the highest quality cut and the lowest heat impact on the material.

OBSAH DIPLOMOVÉ PRÁCE

Seznam použitých značek.....	6
Úvod	8
1. Princip a konstrukce laseru	9
1.1 Historie a vývoj laseru	9
1.2 Fyzikální princip laseru	10
1.3 Konstrukce laseru	15
1.3.1 Aktivní prostředí	16
1.3.2 Budicí zdroj.....	16
1.3.3 Rezonátor	16
1.4 Vznik a vlastnosti laserového záření	18
1.5 Výkon a účinnost laseru.....	22
1.5.1 Výkon laseru	22
1.5.2 Účinnost laseru	22
2. Rozdělení a klasifikace laseru	23
2.1 Pevnolátkové lasery	24
2.1.1 Nd:YAG laser	25
2.2 Plynové lasery.....	27
2.2.1 CO ₂ laser	28
2.3 Kapalinové lasery	29
2.4 Polovodičové lasery	31
2.5 Plazmatické lasery	32
2.6 Nové druhy laserů	33
2.6.1 Vláknové lasery	33
2.6.2 Kotoučový laser	34
3. Laser a jeho aplikace	35
3.1 Průmysl	35
3.1.1 Svařování laserem.....	36
3.1.2 Vrtání a řezání laserem	37
3.1.3 Tepelné zpracování laserem.....	38
3.1.4 Ostatní metody použití laseru v průmyslu	39
3.2 Další aplikace laseru	40
4. Tepelné dělení.....	41
4.1 Laserová technologie řezání	41
4.2 Interakce záření s materiálem	43
4.3 Proces řezání	44
4.3.1 Tavné řezání laserem	46
4.3.2 Sublimační řezání laserem	46
4.3.3 Oxidační řezání laserem.....	47
4.3.4 Laserové řezání s podporou vzduchu.....	48
4.4 Laserové plyny.....	48
4.4.1 Rezonátorové plyny	48
4.4.2 Technologické – asistenční plyny.....	49

4.5	Parametry laserového řezání	50
4.6	Kvalita povrchu v místě řezu	53
4.7	Vady při řezání laserem	56
5.	Vlastní experiment	58
5.1	Zkušební materiál	58
5.2	Použitý laserový systém.....	59
5.3	Průběh experimentu	61
5.3.1	Laserové řezání vzorků	61
5.3.2	Metalografická analýza	63
5.4	Vyhodnocení	67
5.4.1	Makroskopické vyhodnocení vzorků.....	70
5.4.2	Mikroskopické vyhodnocení vzorků	73
5.4.3	Měření mikrotvrdosti	75
Závěr	76	
Seznam použité literatury	77	

Seznam použitých značek

Symbol	Význam	Jednotka
a	referenční přímka	[-]
Δa	zmenšení tloušťky řezu	[mm]
Al_2O_3	oxid hlinitý	[-]
b	skluzová rýha	[-]
c	směr posuvu	[-]
CAM	počítačem podporovaná výroba	[-]
CO_2	oxid uhličitý	[-]
Cr^{3+}	kation chromitý	[-]
cw	kontinuální režim laserového svaku	[-]
Č	čerpání	[-]
ČSN EN ISO	Mezinárodní norma	[-]
d	průměr trysky	[mm]
d_m	průměr svazku	[mm]
E	energetická hladina	[J]
E_0	základní energetická hladina	[J]
E_1	základní energetická hladina	[J]
E_2	vybuzená energetická hladina	[J]
ΔE	rozdíl mezi energetickými hladinami	[J]
Er:YAG	yttrium-aluminium-granátu, dopovaný erbiem	[-]
f	rozteč skluzových čar	[mm]
FCC	krychlová plošně středěná mřížka	[-]
h	Planckova konstanta	[J . s]
HDL	vysoce výkonné diodové lasery	[-]
k	Boltzmanova konstanta	[J . K ⁻¹]
K	kvalita svazku	[-]
l	délka	[mm]
ln	celková vyhodnocovaná délka	[mm]
L	vzdálenost mezi zrcadly	[mm]
$M_{23}C_6$	sekundární karbid	[-]
M_6C	sekundární karbid	[-]
n	skluz	[mm]

N_1	počet částic na hladině s nižší energií	[-]
N_2	počet částic na hladině s vyšší energií	[-]
Nd^{3+}	iont neodymu	[-]
Nd:YAG	ytrium-aluminium-granátu, dopovaný neodymem	[-]
Nd:YLF	lithium-ytrium-fluoridu, dopovaný neodymem	[-]
p	tlak plynu	[MPa]
pw	pulsní režim laserového svazku	[-]
Qs	impulsní režim laserového svazku	[-]
RE	relaxační přechody	[-]
Re	mez kluzu	[MPa]
Rm	mez pevnosti	[MPa]
Rz5	průměrná výška prvků profilu	[μm]
s	tloušťka materiálu	[mm]
SE	stimulovaná emise	[-]
T	termodynamická teplota	[K]
TEM	transverzální elektromagnetický mód	[-]
TEM_{mn}	transverzální elektromagnetický mód v kartézských souřad.	[-]
TEM_{pl}	transverzální elektromagnetický mód ve válcových souřad.	[-]
TEM_{00}	transverzální elektromagnetický mód nejnižšího řádu	[-]
TOO	tepelně ovlivněná oblast	[μm]
$Y_3Al_5O_{12}$	Ytrium Aluminium Granátu	[-]
u	úchylka kolmosti	[mm]
UV	ultrafialové záření	[nm]
v	rychlost řezání	[m.min ⁻¹]
V	objem plynu	[m ³]
β	úhel šikmého řezu	[°]
Θ	divergence	[mrad]
λ	vlnová délka	[nm]
λ_w	vlnová délka záření	[μm]
π	Ludolfovo číslo	[-]
ν	frekvence záření	[s ⁻¹]
γ	modifikace	[-]

Úvod

Diplomová práce je zpracována na základě požadavku firmy Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. se sídlem v Hlubočkách – Mariánském Údolí u Olomouce. Tato firma je součástí nadnárodní společnosti Honeywell, Inc. se sídlem v USA – Phoenix, Arizona. Společnost Honeywell jako jeden ze světových leaderů v leteckém průmyslu má v České republice stále rozšiřující se okruh aktivit - návrh a výroba částí turbínových motorů, vývojové práce, zákaznickou podporu a prodej. [31]

Stále rostoucí požadavky na kvalitu, životnost a přesnost při výrobě plechových a žárových dílů leteckých turbínových motorů vyžadují nové aplikace materiálů. Jedná se především o výrobky z nerezavějících ocelí a speciálních slitin (hliníkových, niklových, kobaltových a titanových). Tyto nově používané materiály kladou vysoké požadavky při jejich zpracování. Proto jsme mnohdy nuceni při jejich obrábění aplikovat nekonvenční technologie, jelikož klasické metody obrábění často nesplňují zmíněné požadavky. Jako nekonvenční označujeme technologie, u kterých nedochází k úběru materiálu v důsledku použití mechanické práce, ale využívají fyzikálních, chemických procesů nebo jejich kombinací. Jednou z těchto technologií je obrábění materiálu svazkem laseru.

V současné době je použití laseru ve firmě Honeywell jednou z nejdůležitějších metod výroby, nejen pro vynikající vlastnosti při obrábění těžko obrobitelných slitin, ale i z důvodu kusové výroby, kde je nasazení laseru velmi výhodné. Technologie výroby plechových a žárových dílů se realizuje hlavně pomocí laserových obráběcích strojů. Jedná se především o laserové vrtání a řezání, kterým se zhotovuje požadovaný tvar, rozměr a dosahuje předepsané jakosti obrobených ploch. S komponenty zde vyrobenými se můžeme setkat v mnoha dopravních letadlech typu Boeing a Airbus, v obchodních letadlech Dassault Falcon, Cessna Citation, Learjet a helikoptérách. [31]

Podstatou diplomové práce je přiblížit nekonvenční technologii laseru, její vývoj, vlastnosti a použití. Podrobně je v popsána metoda tepelného dělení materiálu pomocí laseru a dosažené parametry řezné spáry. Experimentální část se skládá ze dvou navazujících postupů. V první části jsou popsány metody přípravy a zpracování zkušebních vzorků. Část druhá je zaměřena především na vyhodnocení kvality řezu a nalezení optimálních parametrů.

1. Princip a konstrukce laseru

1.1 Historie a vývoj laseru

Vývoj poznatků o laseru začíná popisem teoretických základů vynucené emise záření, které podal Albert Einstein v roce 1917. Ve své práci upozornil na možnost existence spontánní, ale i stimulované emise (atomy mohou vyzařovat světlo nejen spontánně, ale také vynuceným způsobem). Následující krok směrem k vynálezu laseru provedl ruský fyzik V.A. Fabrikant, jenž v roce 1939 ukázal na možnost využití stimulované emise k zesílení elektromagnetického záření procházejícího prostředím. Teprve až začátkem 50. let 20. století byly položeny základy nového oboru – kvantové fyziky, ty daly vzniknout i zcela novému oboru, oboru fotoniky, zabývajícímu se vlastnostmi a metodami využití optického záření s kvantovým charakterem interakce toku fotonů, metodami jeho generování, detekce nebo i přeměn na jiné druhy energie. Na základě toho se podařilo sestavit zařízení, která generují a zesilují elektromagnetické záření na principu stimulované emise záření. Tehdy se poprvé objevil i předchůdce dnešního laseru – způsob zesilování mikrovln stimulovanou emisí záření, označený symbolem MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) První maser sestavili v roce 1953 Charles Townes, J. P. Gordon a H. J. Zeiger. Tento prototyp však nebyl schopen pracovat nepřetržitě. [1], [11], [13]

První projekt laseru navrhli C. H. Townes a L. W. Shawlow v roce 1958. O dva roky později v roce 1960 Theodore H. Maiman v USA sestavil první funkční LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Jako aktivní prostředí použil krystal rubínu s využitím tří energetických hladin, laser mohl pracovat pouze v pulzním režimu. Sovětští fyzici Nikolaj Basov a Alexander Prochorov pracovali nezávisle na problému kvantového oscilátoru a vyřešili problém nepřetržitého výstupu záření tím, že použili více než dvě energetické hladiny a umožnili tím vytvoření populační inverze. Nobelovu cenu za fyziku obdrželi v roce 1964 vědci C. H. Townes, N. Basov, A. Prochodiv za zásadní výzkum v oboru kvantové elektroniky, který vedl ke konstrukci oscilátorů a zesilovačů na principu maseru a laseru. V dnešní době existuje celá řada laserů, které se odlišují fází aktivního media, způsobem buzení, resp. druhem děje, při kterém je umožněno tzv. čerpání laseru. Postupně byla realizována další laserová zařízení na bázi pevných, plyných a kapalných aktivních látek. Díky tomu může laser vypadat třeba jako miniaturní elektronická součástka, jako skleněné vlákno dlouhé desítky metrů, nebo jako

komplikovaná chemická aparatura. Při tom může svou energii čerpat z obyčejné elektrické baterie, ze slunečního záření nebo třeba z jaderného výbuchu. [1], [12], [23]

Od spuštění prvního laseru uběhlo více jak čtyřicet let. Během této doby se technologie generování a zesilování elektromagnetického záření začala z laboratoří pronikat do nejrůznějších oblastí vědy a lidských činností (průmyslu, sdělovací techniky, medicíny, meteorologie, biologie, dopravy, stavebnictví, vojenské i kosmické techniky). Dnes už nás lasery přímo nebo nepřímo provázejí prakticky na každém kroku. [12]

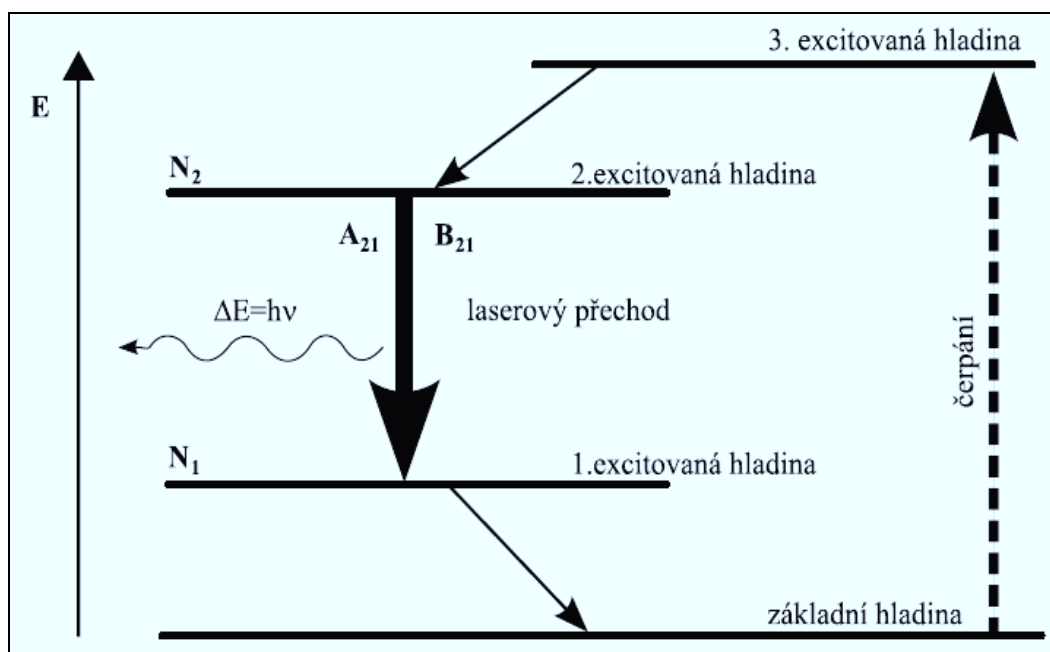


Obr. 1.1 Schéma prvního (rubínového) laseru [23]

1.2 Fyzikální princip laseru

Abychom porozuměli principům, na jakých je založena konstrukce laseru, musíme se seznámit aspoň se základními poznatky atomové a kvantové fyziky. Elektrony jsou v atomu uspořádány podle své energie v energetických hladinách (drahách, orbitách). V klidovém stavu nejsou všechny možné energetické stavy obsazeny. Přívodem energie (elektromagneticky, opticky) mohou být elektrony vyneseny z klidových poloh do energeticky vyšších úrovní (buzení, čerpání). Při návratu vybuzeného elektronu na energeticky nižší úroveň se uvolní čerpáním získaná energie jako záření. Přejít elektronu ze základní energetické hladiny E_0 na vyšší energetickou hladinu E doprovází absorpce a přechod z vyšší hladiny na základní emise s přesně určenou hodnotou energie. Tato hodnota energie se rovná rozdílu energie mezi sousedními hladinami (kvantová energie) a ve své podstatě znamená elektromagnetické záření určité frekvence. [9], [12]

Při pohlcení energie látkou přechází částice ze základního stavu na stav s vyšší energií, ve kterém setrvávají pouze určitý čas. Střední doba, po kterou zůstane částice ve vybuzeném stavu, se nazývá dobou života energetické hladiny. Pro většinu vybuzených stavů je tato doba 10^{-9} až 10^{-6} s. Tyto tzv. seskoky elektronů z vybuzených stavů probíhají synchronně a vyzařují energii současně, takže se záření generuje se stejnou fází. Tím vzniká fotonová lavina stejného kmitočtu a fáze. Vlivem vícenásobných odrazů na odrazných (planoparalelních i zakřivených) čelních plochách vzniká uvnitř laseru stojaté vlnění a laser vyzařuje vysoce směřované koherentní záření. Existují ale hladiny s dobou života 10^{-3} s i delší. Takové hladiny se nazývají metastabilní. Na takových hladinách je možné, aby populace byla mnohem vyšší než odpovídá rovnovážnému stavu. [1], [4], [9]



Obr. 1.2 Přechod mezi elektronovými hladinami [1]

Atom, který pohltí zvenku kvantovou energii, tedy elektromagnetickou vlnu s frekvencí patřící této energii a následkem toho přejde do stavu s vyšší energií, se nazývá vybuzený atom. Vybuzený atom se může vrátit do základního stavu (na nejnižší energetickou hladinu) odevzdáním nadbytečné energie. Jedním ze způsobů odevzdání nadbytečné energie je spontánní emise ve formě elektromagnetického záření. Podle kvantové teorie světla je velikost kvantové energie E úměrná rezonanční frekvenci záření ν . [1], [9], [12]

$$E = h \cdot \nu \quad (1.1)$$

Kde:

Eenergetický rozdíl mezi hladinami [J],

h Planckova konstanta [$6,62 \cdot 10^{-34}$ J . s],

ν frekvence vyzářeného fotonu [s^{-1}].

K tomu, aby došlo ke zvýšení počtu atomů v některé z vyšších energetických hladin je potřebné vnější působení, které se nazývá čerpání. Druh aktivního media a jemu odpovídající způsob čerpání určuje i oblast vlnové délky, na které dojde k vyzáření elektromagnetického vlnění. Čerpáním laseru rozumíme vybudování systému vnějším polem na vyšší energetický stav s cílem dosažení inverzní populace hladin. Vybudování se dosahuje absorpcí energie z vnějšího pole. Důležitou roli zde hraje schopnost látky absorbovat dostatečné množství energie o vhodné vlnové délce. Pro čerpání můžeme použít různé druhy energie (optickou, tepelnou, chemickou, elektrickou,...). Obsazení energetických hladin se řídí Boltzmannovým rozdělením. [1], [9], [12]

Boltzmannův vztah:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{\frac{h \cdot \nu}{k \cdot T}} \quad (1.2)$$

Kde:

N_1 počet částic na hladině s nižší energií [-],

N_2 počet částic na hladině s vyšší energií [-],

kBoltzmannova konstanta [J . K⁻¹],

h Planckova konstanta [$6,62 \cdot 10^{-34}$ J . s],

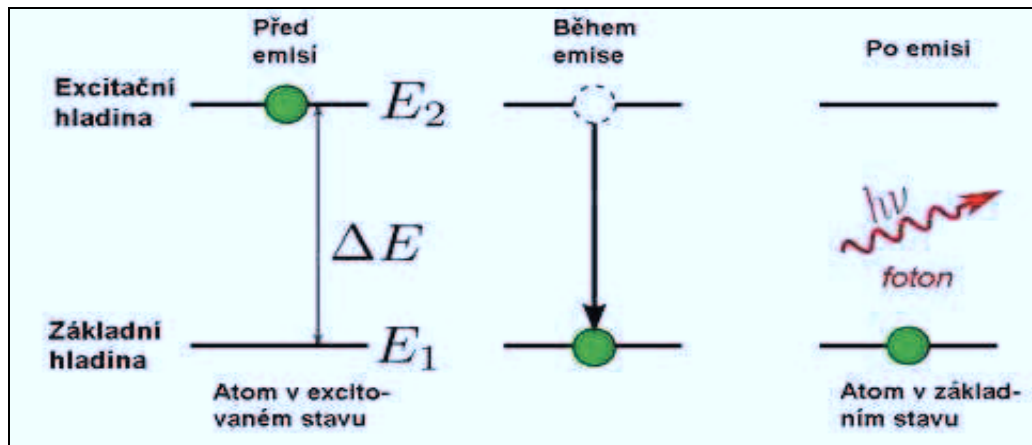
ν frekvence vyzářeného fotonu [s^{-1}],

T teplota soustavy [K].

Po načerpání nastává porušení rovnováhy, neboli inverze. Atomy zůstávají na metastabilní energetické hladině určitou dobu, přičemž může dojít k těmto jevům: [9], [14]

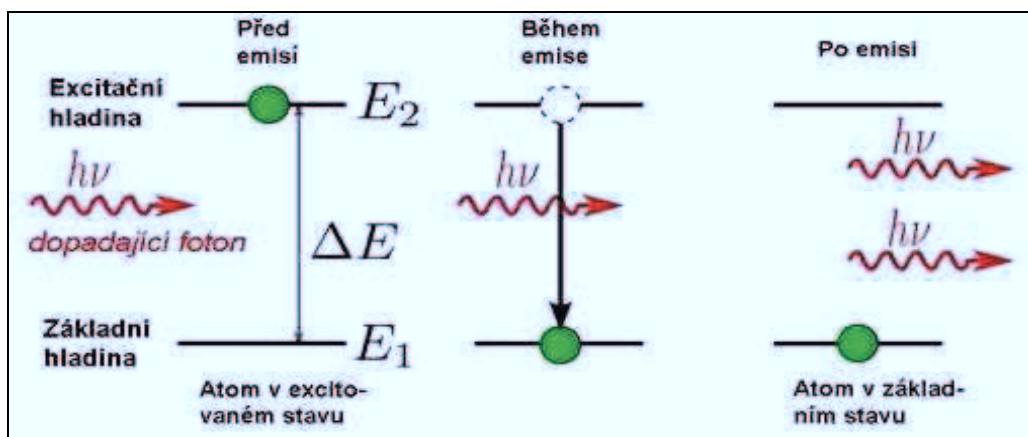
- **spontánní emise** – jedná se o zářivý kvantový přechod z vyšší energetické hladiny na nižší (tento přechod nezávisí na působení vnějšího elektromagnetického záření). Atom se nejdříve nachází v excitovaném stavu, potom přechází do základního

stavu, což trvá řádově desetiny femtosekundy, po dosažení základního stavu, má odchozí foton náhodné polarizace a směru, energii rovnou rozdílu energetických hladin viz obr. 1.3,



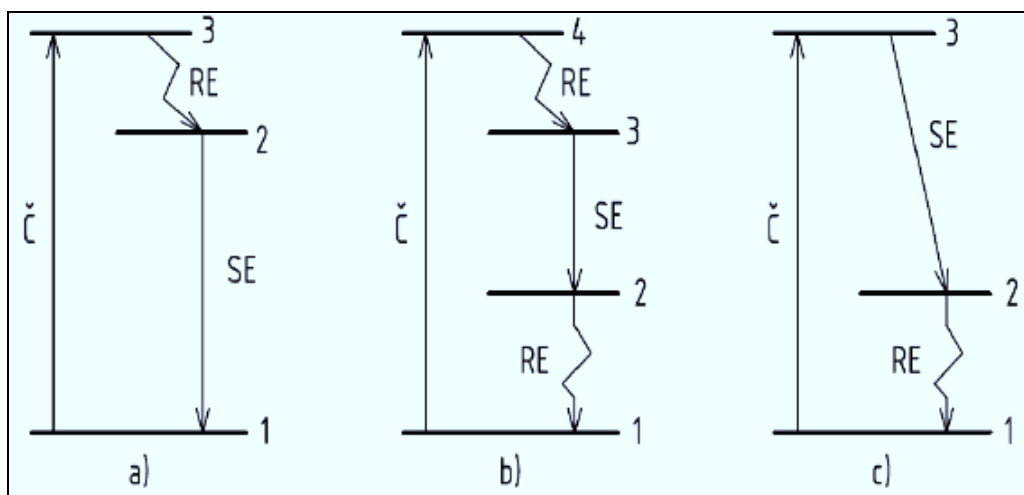
Obr. 1.3 Princip spontánní emise [15]

- **relaxační přechody** – jsou přechody vyvolané různými mechanismy (srážky částic),
- **absorpce** – je pohlcení či zeslabení záření při jeho šíření aktivním prostředím,
- **stimulovaná emise** – je zářivý kvantový přechod z vyšší energetické hladiny na nižší, který lze využít k zesilování a ke generaci elektromagnetického záření, což vedlo ke zkonstruování prvního laseru. Na začátku se nachází atom v excitovaném stavu a dopadající foton, uprostřed přechází atom do základního stavu a nastává emise fotonu, v poslední fázi se nachází atom v základním stavu a dva vzniklé odchozí fotony stejné vlnové délky, polarizace a směru.



Obr. 1.4 Princip stimulované emise [16]

Podle způsobu čerpání, relaxace a stimulované emise poznáme různé systémy, které jsou dané použitým aktivním prostředím. Aktivním prostředím je myšlena pracovní látka (pevná, plynná, kapalná) v kvantových zesilovačích, nasycená více atomy na vyšších energetických hladinách. Rozeznáváme dvou, tří, čtyř a více hladinových systémů viz obr. 1.5. Buzení rozlišujeme jako přímé a nepřímé. Při nepřímém buzení je příjem energie potřebný na dosažení inverze zprostředkovaný jinou látkou než je aktivní látka. [1]



Obr. 1.5 Hladinové modely [1]

a) tříhladinový, b) čtyřhladinový, c) tříhladinový s přímým čerpáním inverzní hladiny, (1,2,3,4 – energetické hladiny, Č – čerpání, RE – relaxační přechody, SE – stimulovaná emise)

Na rozdíl od běžného světelného záření, které se šíří všemi směry, vzniká laserové světlo v prostředí určitého stimulujícího elektromagnetického záření potlačením spontánní emise na úkor vynucené emise záření. Jestliže označíme základní energetický stav E_1 a vybuzený stav E_2 , potom z Bohrova zákona samovolná emise záření vzniká, když atomy s energetickou hladinou E_2 mají tendenci zaujmout hladinu s nižší energií E_1 a přitom emitují kvantum světelného záření s frekvencí ν , která se určí z rovnice: [1]

$$E_2 - E_1 = h \cdot \nu \quad (1.3)$$

Kde:

E_1 základní energetická hladina [J],

E_2vybuzená energetická hladina [J],

h Planckova konstanta [$6,62 \cdot 10^{-34}$ J . s],

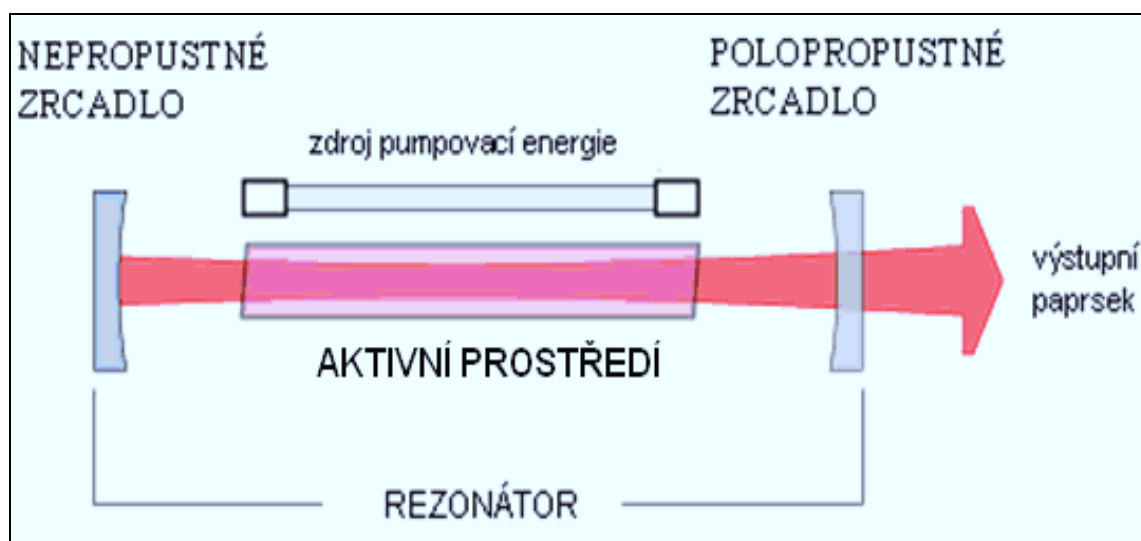
ν frekvence vyzářeného fotonu [s^{-1}].

Laser je tedy kvantový generátor světelných svazků sloužící k zesilování světelných vln pomocí stimulové emise záření. Svazek laserových paprsků je zdrojem s vysokou hustotou energie, přičemž záření vychází z laseru ve formě málo rozbíhavého, monochromatického (s jednou vlnovou délkou) svazku paprsků a koherentních elektromagnetických vln v širokém rozsahu vlnových délek od oblasti ultrafialové přes viditelné světlo, dále oblast infračervenou až k hranici milimetrových vln.

1.3 Konstrukce laseru

Z praktického hlediska laserový svazek koncentruje vysokou energii do velmi malé plochy, což umožní natavení případně až odpaření materiálu z plochy menší než mm^2 ve zlomcích sekundy. Zmíněné skutečnosti se využívá v praxi při technologiích dělení materiálu, obrábění, svařování, tepelného zpracování či vytváření speciálních povrchových vrstev. Laserové technologie umožňují řezat velmi tvrdé materiály při vysoké kvalitě a rychlosti řezu či vrtat otvory o velikosti setin milimetru. Jednotlivé aplikace však závisí na konstrukci laseru. [7]

Ačkoli existuje velké množství různých typů laserových generátorů, každý v sobě zahrnuje tři podstatné části. Mezi tyto části, které tvoří tělo laseru, patří laserové aktivní prostředí (aktivní látka), ve kterém probíhá zesilování záření, budící zdroj (čerpání) pro excitaci aktivního prostředí a rezonanční systém (rezonátor), vytvářející zpětnou vazbu mezi zářením a aktivním prostředím vedoucí ke vzniku laserových oscilací. [9]



Obr. 1.6 Základní části laseru [12]

1.3.1 Aktivní prostředí

Podstatou laseru je mnohonásobný odraz a zesílení světla uvnitř tzv. aktivního prostředí, které je na obou stranách zpravidla ohraničeno zrcadly. Aktivní prostředí laseru je systém kvantových soustav schopných pod vlivem přívodu excitační (budící) energie přejít do excitovaného stavu a setrvat v něm dostatečně dlouhou dobu. Aktivním prostředím je myšlena látka plynná, pevná či kapalná, která je nasycená více atomy, ionty, molekulami a jejich směsí (plyn, plazma) na vyšších energetických hladinách. Tyto atomy dále mohou emitovat dvojnásobnou světelnou energii. Aktivní prostředí je nejdůležitější částí laserového zařízení, neboť v něm vzniká stimulovaná emise a lze podle něj lasery dále dělit do skupin. [9], [12]

1.3.2 Budicí zdroj

Vhodným buzením aktivní látky je do prostředí dodávána excitační energie a docílíme jevu, který se nazývá inverse populace. Jedná se o nerovnovážný stav, kdy existuje více atomů na vyšších energetických hladinách než na nižších. Inverze populace je uvnitř aktivního prostředí nezbytnou podmínkou pro to, aby docházelo k zesilování světla (stimulovaná emise). Způsob buzení závisí na použitém aktivním prostředí. Buzení může být zajištěno optickým zářením (výbojka, laserová dioda), elektrickým výbojem, elektronovým svazkem, chemickou reakcí, expanzí plynu, injekcí nosičů náboje, rekombinací atd. Dodaná energie je pak různými procesy přeměněna na energii ionizační. Zdroje buzení mohou pracovat jak kontinuálně tak pulsně. Na následujícím grafu je vidět závislost optického výkonu laseru (resp. pravděpodobnost stimulované emise) na dodávaném čerpaní elektrickým proudem. [9], [12], [17]

1.3.3 Rezonátor

Další podmínkou pro vznik laseru je zpětná vazba mezi vyzařovanými fotony, čímž dochází k zesílení výstupního záření. Tuto úlohu zabezpečuje rezonátor, který je společně s čistotou aktivního prostředí nejsložitější technologická součást laseru. Rezonátor je optická dutina, do které je vložena aktivní látka, což umožňuje více násobnou stimulovanou emisi. Ve většině případů je rezonátor tvořen dvěma zrcadly, zajišťující kladnou zpětnou vazbu záření do aktivního prostředí, přičemž je jedno zrcadlo odrazové a druhé polopropustné a z venčí je opatřen chladičem. Polopropustné zrcadlo přepustí část vzniklé světelné vlny ven z aktivního prostředí a druhá část vlny se vrací zpět, kde

umožňuje další zesílení světla. Nejjednodušším a nejrozšířenějším rezonátorem je rovinný rezonátor s paralelními zrcadly. Dalším používaným typem jsou konfokální rezonátory, polokoncentrické nebo prstencové (kruhové) rezonátory. Správný chod rezonátoru je zajištěn v tom případě, že v něm vzniká stojaté vlnění. Podstatná je vzdálenost zrcadel, která závisí na vznikajícím záření podle vztahu: [9], [12], [17]

$$L = n \cdot \lambda \quad (1.4)$$

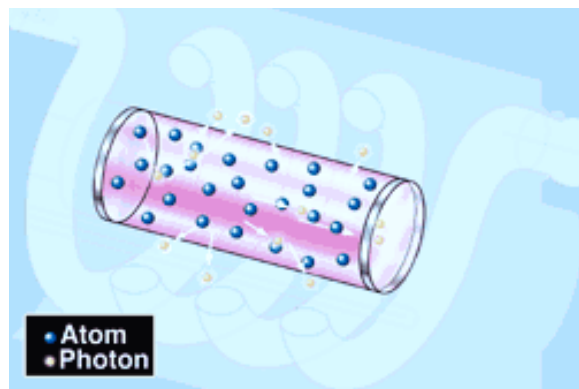
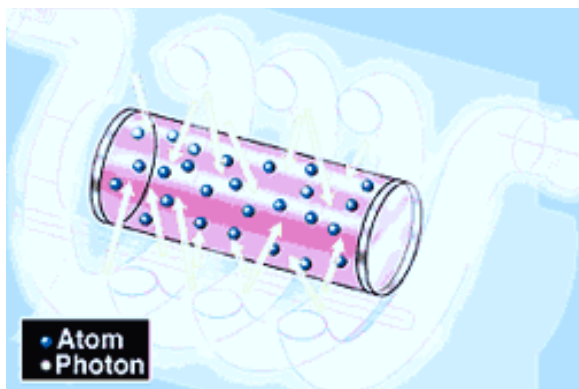
Kde:

Lvzdálenost mezi zrcadly [mm],

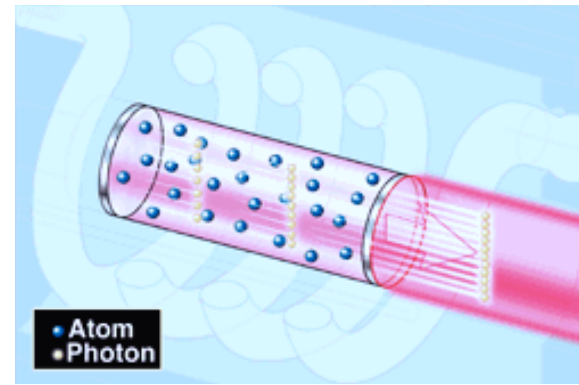
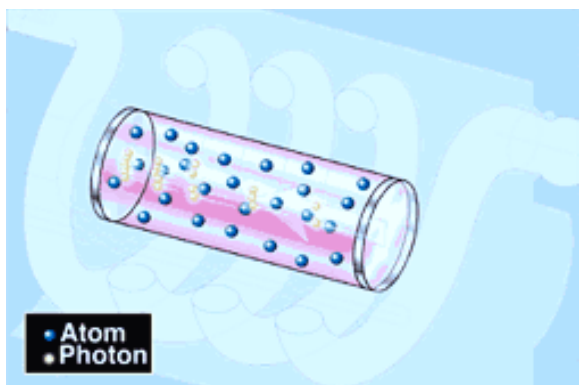
npřirozené číslo [-],

λvlnová délka záření [nm].

Některé lasery s dostatečně velkým ziskem v aktivním prostředí rezonátor nepotřebují (dusíkový nebo měděný). Tyto lasery pracují superradiačně – to znamená, že záření stačí jediný průchod k získání dostatečné intenzity. U laserových zesilovačů, které slouží k zesílení při průchodu vstupujícího koherentního svazku, se rezonátor rovněž nepoužívá. [17]



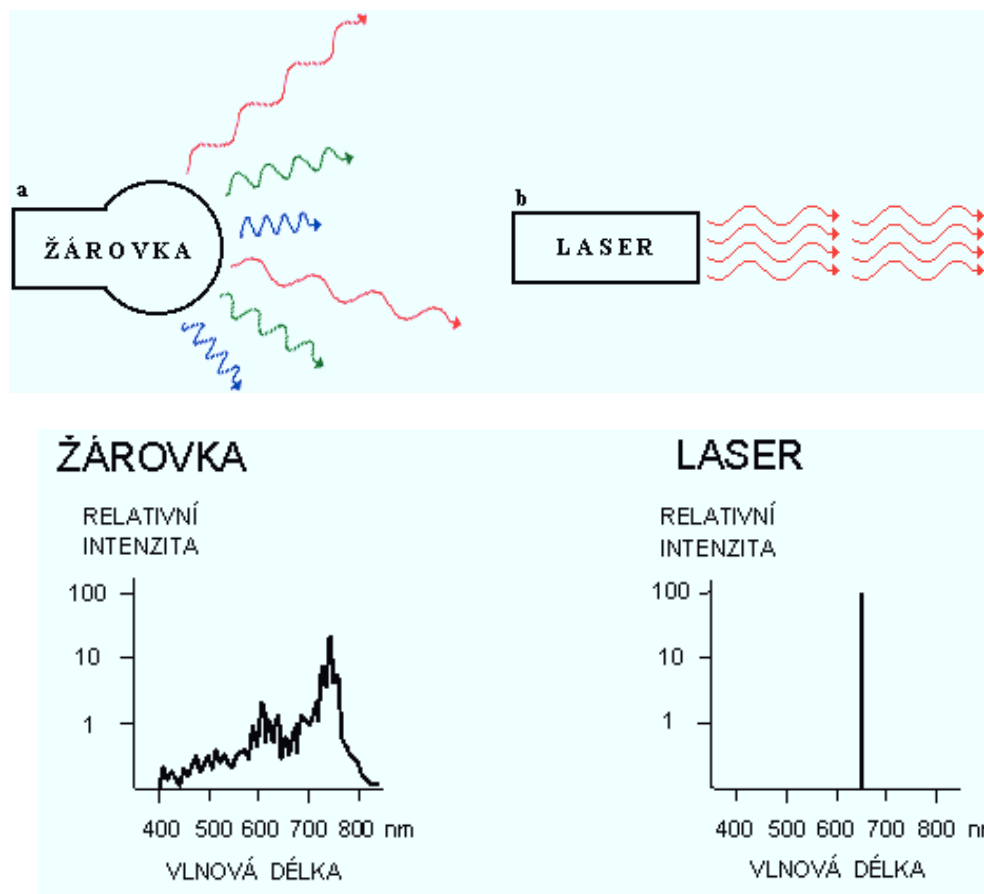
Obr. 1.7 Vznik stimulované emise [18]



Obr. 1.8 Vznik laserového svazku [18]

1.4 Vznik a vlastnosti laserového záření

Jedinečnost laserového záření oproti záření elektromagnetickému, které vzniklo jiným způsobem je v řadě jeho vlastností. Mezi nejdůležitější patří: [1], [9], [14]



Obr. 1.9 Porovnání záření žárovky a laseru [19]

- **monochromaticita** – ta vyplývá z podstaty jevu stimulované emise. Laserový svazek je v ideálním případě tvořen především fotony stejné vlnové délky. Reálné generátory splňují tuto podmínku s velmi malými odchylkami.
- **koherentnost** – koherentní vlnění jsou taková, která mají stejnou frekvenci a jejich fázový rozdíl je v daném bodě neměnný. V prostorově koherentním svazku kmitají částice světelné vlny se stejnou fází v kolmé rovině na směr šíření svazku.
- **směrovost** – jednou z důležitých vlastností laserového paprsku je jeho velká směrovost. Podmíněná je tím, že záření na výstupu z laseru, na povrchu polopropustného zrcadla je koherentní (sfázované) na ploše, která je větší než vlnová délka záření. Směrovost je charakterizována prostorovým úhlem. V praxi

se uvádí jako rovinný úhel divergence paprsku. Obecně je možné určit velikost divergence Θ jako závislost na vlnové délce λ_w a výstupního průměru paprsku d_m podle vztahu:

$$\Theta = \frac{4 \cdot \lambda_w}{\pi \cdot d_m} \quad (1.5)$$

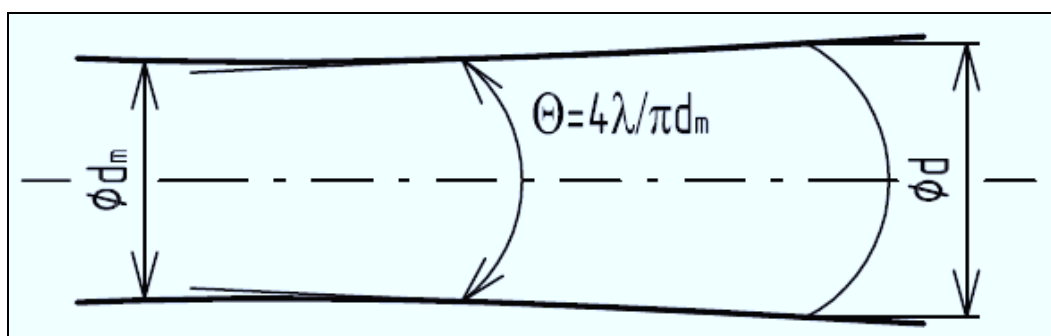
Kde:

Θ velikost divergence [mrad],

λ_w vlnová délka záření [nm],

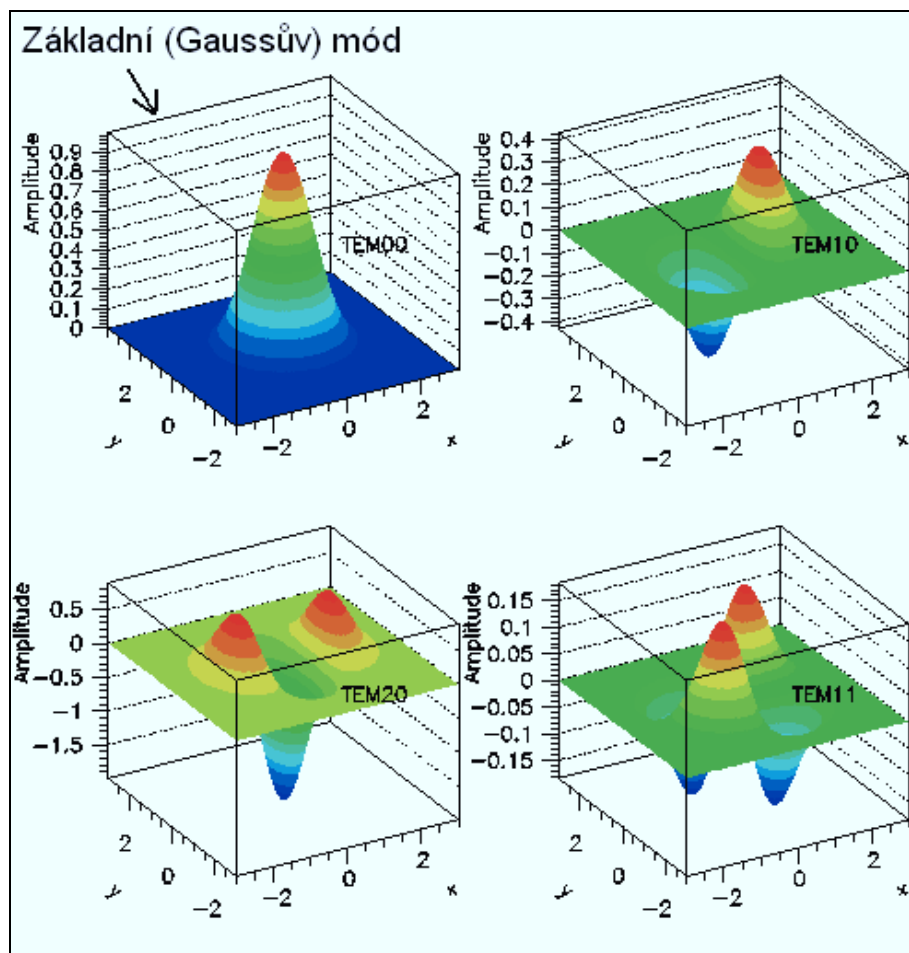
πLudolfovo číslo [-],

d_mprůměr svazku na výstupu z rezonátoru [mm].



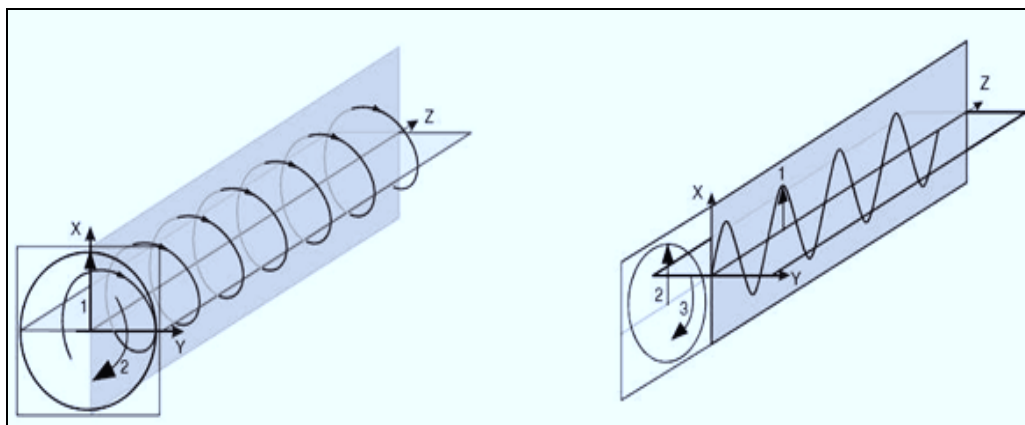
Obr. 1.10 Divergence laserového svazku [1]

- **módová struktura** – v optickém rezonátoru existuje pole, které rozděluje amplitudu a fázi vlnění vznikající v rezonátoru. Toto částečné rozdělení pole ovlivňuje transverzální elektromagnetický mód pasivního rezonátoru (TEM). Příčný mód může být definovaný v kartézských souřadnicích (TEM_{mn}), anebo ve válcových (TEM_{pl}). V příčném průřezu paprsek vytváří buď jednoduchou stopu – základní mód, anebo složitější obrazce pravoúhle nebo kruhové symetrické. Důležité jsou indexy m, n ve svislém a vodorovném směru a indexy p, l v radiálním a úhlovém rozložení. Určují počet minim na průřez paprsku a jejich hodnota značně ovlivňuje řád módu. Čím vyšší indexy, tím vyšší řád módu. Mód nejnižšího řádu je mód TEM_{00} . Tento mód má Gaussovo rozložení neboť intenzita elektromagnetického pole měřená kolmo k optické ose má Gaussovský průběh. Mód určuje vhodnost pro určité strojírenské uplatnění jako řezání, sváření apod.



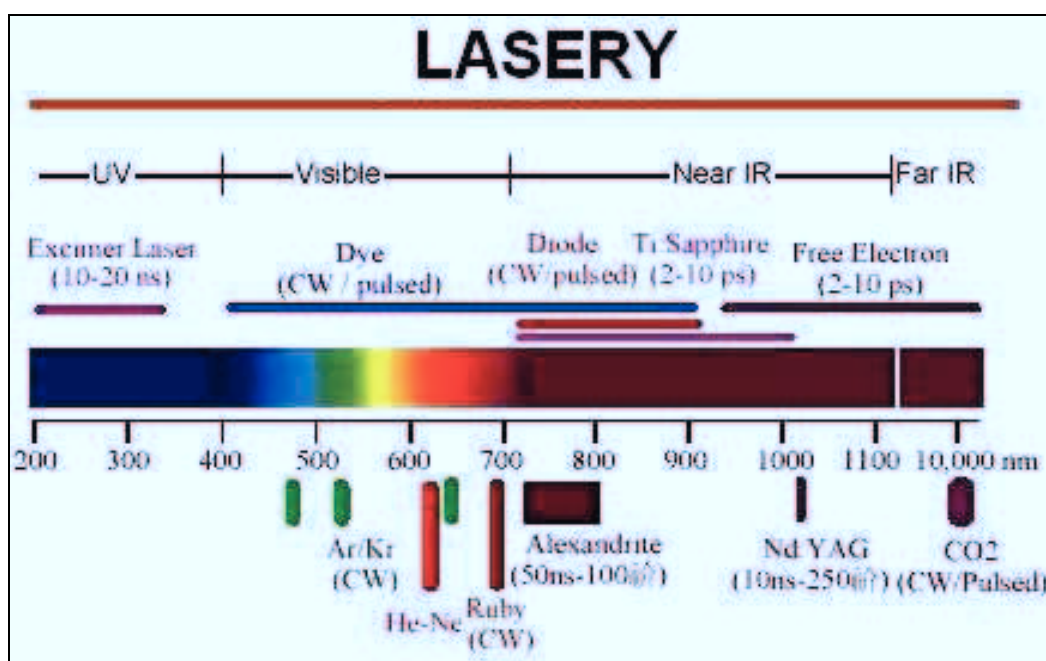
Obr. 1.11 Rozdělení intenzity záření v průřezu výstupního paprsku laseru [6]

- **polarizace** – pokud je vlnění prostorově orientované na definované ploše je polarizované. Polarizace charakterizuje orientaci vektoru elektrického pole v elektromagnetické vlně, může tedy být kruhová (eliptická) – vlnění probíhá na šroubovitě ploše, nebo lineární – vlnění probíhá na rovině ploše. Dále polarizace ovlivňuje absorpci a reflexi.



Obr. 1.12 Kruhová a lineární polarizace [21]

- **vlnová délka** – vlnová délka světla souvisí s jeho barvou. Udává se v nanometrech a určuje, v jaké oblasti spektra se bude laserový paprsek pohybovat viz obr. 1.13. Nejmenší vlnovou délku v oblasti viditelného spektra má fialový laser 395 až 410 nm. V praxi se však používají lasery s vlnovou délkou 1 064 nm a CO₂ lasery s vlnovou délkou až 10 000 nm, které mají v oblasti viditelného spektra červenou barvu. Vlnová délka je navíc důležitá i pro velikost stopy laseru. Podle vlnové délky dělíme lasery na termální, vyznačující se vlnovou délkou vyšší než 630 nm, lasery pracující ve viditelném světle s vlnovou délkou 380 až 630 nm a lasery pracující v UV oblasti, u kterých je vlnová délka pod 380 nm.



Obr. 1.13 Světelné spektrum [6]

Uvedené vlastnosti laserového svazku umožňují jeho fokusaci - soustředit do malého bodu mimořádně vysokou hustotu energie v místě dopadu svazku na zkoumané materiály pomocí vhodné optické soustavy. To má za úkol vyvolat jejich následné strukturální, fázové (ablace) a chemické změny resp. natavení a odpaření materiálu, čímž je dosažen požadovaný efekt zpracování. Zároveň je nutné udržovat materiál vůči paprsku v relativně přesné vzdálenosti, aby se nedostal pod hloubku ostroti. [2]

1.5 Výkon a účinnost laseru

1.5.1 Výkon laseru

Většina laserů s kterými se běžně setkáváme, jsou lasery malého výkonu pracující spojitě, tedy nepřetržitě. Jsou to přístroje využívající kontinuální laser (ukazovátka, tiskárny, kopírky, CD-ROM mechaniky atd.) Při využití laseru v průmyslu a medicíně je určující charakteristikou výkon laseru. Proto se tu hlavně používají impulsní lasery. Celková vyzářená energie nemůže být větší než energie přijata. Výkon laseru je totiž ovlivněn délkou laserového pulsu, čím kratší puls bude, tím dostaneme větší výkon. Výkon laseru je množství vyzářené energie za určitý čas, označuje se ve wattech (W). Množství vyzářené energie se udává v jednotkách joule (J). Při zkrácení pulzu na hodnotu několika nanosekund se docílilo výkonu srovnatelného s malými elektrárnami. Z hlediska technologických aplikací je rozhodující předně optický výkon laseru. Hodnota výkonu by se měla pohybovat v rozmezí 1 až 30 kW. [19], [23]

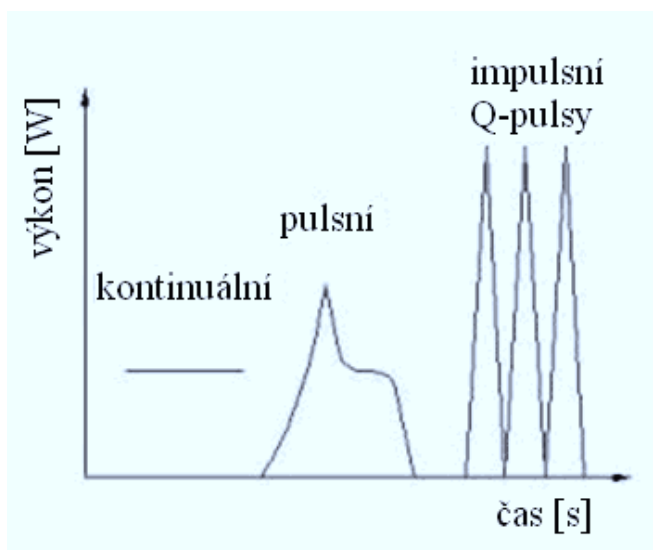
1.5.2 Účinnost laseru

Při charakterizování laserů se někdy zmiňujeme také o jejich účinnosti. Účinnost je vedle pořizovací ceny a nákladů na údržbu jeho činnosti jedním z ekonomických hledisek použitelnosti laseru v průmyslových aplikacích. Účinnost je poměr mezi množstvím energie dodané do zařízení a množstvím energie, které z něho vystupuje. Prvotním zdrojem energie běžně bývá elektrický proud a tak je snaha používat takové lasery, které mají vysoký poměr elektrického napájecího výkonu k výkonu užitečného laserového záření. V různých typech laserů totiž dochází k různě velkým ztrátám, proto je účinnost hlavním faktorem pro jejich použití. Účinnost se u laserových zařízení pohybuje v rozmezí od 0,1 % do 80 %, z tohoto důvodu musíme do laseru přivádět více energie než ji získáme. [19], [23]

2. Rozdělení a klasifikace laseru

Jelikož neexistuje universální laser, který by vyhověl všem podmínkám širokého spektra použití. Můžeme tedy vzhledem k rozmanitosti dostupných laserů, rozdílnosti jejich vlastností, dosahovaných výkonů a oblastí použití, lasery obecně rozdělit dle několika kritérií: [2]

- **aktivní prostředí** (pevnolátkové, plynové, kapalinové, polovodičové, plazmatické),
- **vlnová délka** (infračervené, viditelného pásma, ultrafialové, rentgenové a gama záření),
- **způsobu čerpání energie** (opticky, elektrickým výbojem, elektronovým svazkem, tepelnými změnami, chemicky, rekombinací, injekcí nosičů náboje),
- **režim laserového svazku** (pulsní pw, kontinuální cw, impulsní Qs),



Obr. 2.1 Režim laserového svazku [2]

- **výkon** (nízkovýkonové – desetiny až stovky W, vysokovýkonové – 1 až 30 kW),
- **použití** (technologické, energetické, lékařské, vojenské, měřicí, výzkumné).

2.1 Pevnolátkové lasery

Pevnolátkové lasery pracují především v pulsním, tak i kontinuálním režimu, kde v miliontině sekundy vyzáří výkon řádově miliony wattů. Při tomto provozu je zapotřebí používat účinného chlazení, protože se při velkých čerpacích výkonech krystal značně zahřívá. Na druhou stranu jsou tyto lasery velmi stabilní a mají malé nároky na údržbu. Jako aktivní prostředí se u pevnolátkových laserů používá pevná opticky propustná látka (krystalická, nebo amorfni s příměsí vhodných iontů). [3], [4], [9]

- krystaly (oxidy, granáty, alumináty, fluoridy, oxysulfidy, fosfáty, silikáty, tungstáty, molybdáty, vanadáty, beryláty),
- sklo (velmi perspektivní pro svoji vysokou kvalitu),
- keramika.

Tento základní materiál určuje většinu technických vlastností daného krystalu, nazývá se matrice. Ta musí být průzračná, opticky homogenní a musí být technologicky možné ji uměle vyrábět. Tyčka, která tvoří aktivní prostředí je dokonale vyleštěná a její konce jsou kolmé na osu, nebo svírají s podélnou osou krystalu určitý úhel - Brewsterův. Oba konce tyčky mohou být opatřeny tenkou vrstvou kovu např. stříbra, která vytváří na jedné straně dokonale odrazovou a na druhé polopropustnou plochu. Tyčka je pak umístěna do odrazivé komory (dutiny) s kruhovým, lépe eliptickým průřezem. U pevnolátkových typů laserů se téměř výlučně používá optické buzení, při němž se pomocí vnějšího světelného zdroje, kterým je obvykle výbojka, vyvolá změna v obsazení energetických hladin. Výbojka, nejčastěji v podobě výbojkové trubice, je umístěna v dutině s vysoce odrazovými stěnami. Odrazivost této dutiny by měla být co možná největší (kvůli ztrátám). Výbojku a tyčku je nutno umístit do ohniskové přímky. Pomocí záblesků výbojky a odrazu od stěn dutiny dochází k pronikání světla do tyčky, a tím excitaci atomů a vzniku stimulované emise. Délka budicího impulsu se pohybuje v řádu několika desetin milisekund až jedné milisekundy. Po dosažení stimulované emise zajišťují zrcadla na čele krystalu optickou zpětnou vazbu, takže foton stimulované emise způsobuje další postupné vynucené přechody a ve směru osy tyčky vychází z polopropustného zrcadla světelný paprsek. Jejich záření má vlnové délky v oblasti

infračerveného a viditelného světla. Celková účinnost těchto laserů je však velmi malá. Je to dáno hlavně kvalitou odrazivé dutiny a značným zahříváním krystalu. [3], [4], [9]

Druhy pevnolátkových laserů:

- rubínový laser (Al_2O_3 aktivován ionty Cr^{3+}),
- Nd:YAG laser (yttrium-aluminium-granátu, dopovaný neodymem),
- Nd:YLF laser (lithium-yttrium-fluoridu, dopovaný neodymem),
- Er:YAG laser (yttrium-aluminium-granátu, dopovaný erbiem),
- Ho/CTH:YAG laser.

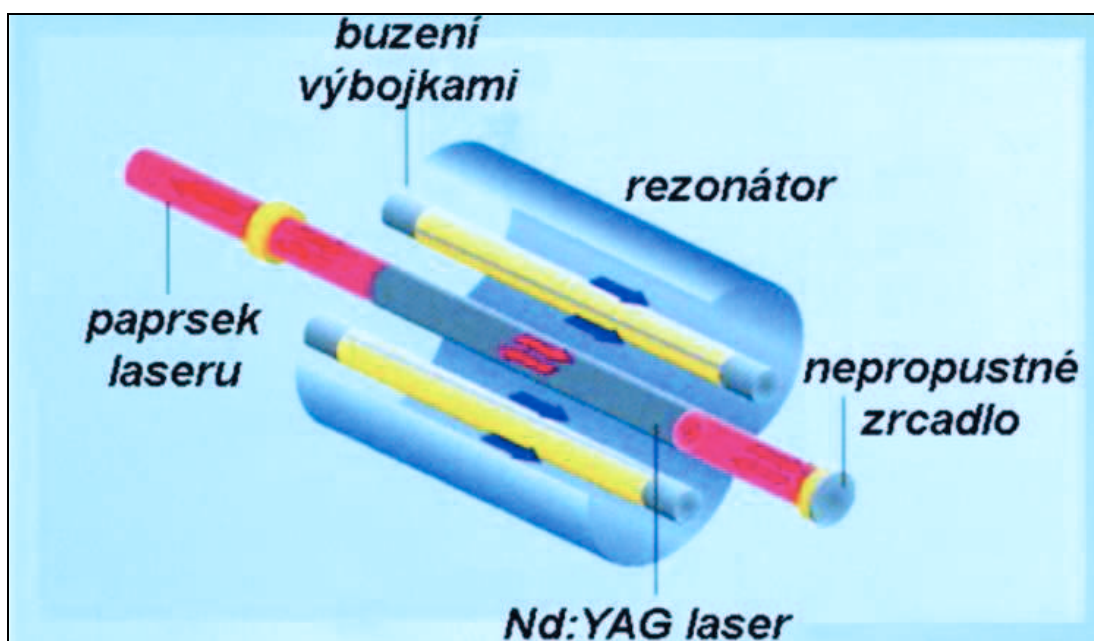
2.1.1 Nd:YAG laser

Nd:YAG laser je v dnešní době nejpoužívanějším pevnolátkovým iontovým typem laseru. Aktivním materiálem je izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) dopovaný ionty neodymu (Nd^{3+}). Krystal je velmi stabilní a vyniká vysokou hustotou energie a akumulační schopností, umožňující generovat krátké vysokovýkonové pulsy. Typická vlnová délka záření za pokojové teploty v pulsním i kontinuálním režimu je 1064 nm, s menší účinností však může emitovat i záření o vlnových délkách 940, 1120, 1320, 1440 nm. Metodami nelineární optiky je možno dosáhnout generace záření na vlnové délce 532 nm, případně 355 nebo 266 nm. Nd:YAG laser dosahuje na vlnové délce 1064 nm v kontinuálním režimu (cw) maximálního výkonu od stovek do tisíců wattů, v pulsním režimu se dosahuje energie pulsů do desítek joulů. Délka pulsů je od zlomku sekundy do 5 piko sekund, podle druhu použité modulace kvality rezonátoru.

Konstrukce pevnolátkových laserů je ve srovnání s plynovými lasery podstatně kompaktnější a jednodušší. Oproti CO_2 laseru mají kratší, příznivější vlnovou délku a při údržbě dochází jen k výměně čerpacích výbojek. Výbojky na bázi kryptonu i krystal se neustále zahřívají a jsou proto chlazeny vodou. Výbojky jsou uzavřeny v dutině rezonátoru, která se volí vždy tak, aby většina světla byla odražena zpět do krystalu. Dutina bývá ke zvýšení odrazivosti světla pokovená. Jednou z výhod paprsku u Nd:YAG laseru je možnost přenosu pomocí optických vláken na vzdálenost několik desítek metrů. Nevýhodou tohoto laseru je poměrně nízká účinnost 2 až 5 % s výkonem do 6 kW. Značný

elektrický příkon výkonových systémů způsobuje, že většina energie je přeměňována v teplo, z čehož plynou značné nároky na chlazení systému. Jestliže nestačíme dostatečně chladit krystal, tepelné pnutí může způsobit jeho zakřivení. Krystal potom působí jako čočka a odchyluje záření. Uvedené nedostatky se v dnešní době pokouší odstranit několik výrobců nahrazením výbojkového čerpání čerpáním polovodičovými diodami. Takové systémy pak vynikají vyšší účinností 10 až 20 %, nižší spotřebou elektrické energie, chladicí vody a nižší hmotností oproti jiným laserům. Nevýhodou je ovšem velmi vysoká cena vysokovýkonových polovodičových laserových diod, která brzdí rozšíření takovýchto laserových systémů.

Oblast použití Nd:YAG laseru je velmi široká. V průmyslu se jedná především o vrtání, svařování, řezání a popisování. Pevnolátkový Nd:YAG laser se zářením na vlnové délce 1064 nm se používá pro zpracování slabších kovových i nekovových či speciálních materiálů. Uplatnění našel i v lékařství kde kontinuální Nd:YAG laser slouží jako skalpel v chirurgii a pulsní Nd:YAG laser v oční mikrochirurgii. Dále se používá například v radarové technice a ve spektroskopii. [3], [4], [23]



Obr. 2.2 Konstrukce Nd:YAG laseru [3]

2.2 Plynové lasery

Aktivní prostředí plynového laseru je v plynné fázi a tvoří jej atomy, ionty nebo molekuly, přičemž inverze obsazení nastává mezi energetickými hladinami některé složky. Objem tohoto plynu je možno podle potřeby zvětšovat, plynulým přítokem je možné dodávat stále nové aktivní prostředí. Jejich rozsah je značný, pracují převážně v kontinuálním režimu, ale existují i pulsní systémy, které dosahují mimořádně vysokých výkonů. Buzení plynových laserů lze provádět různými fyzikálními a fyzikálně-chemickými procesy (elektrickým výbojem, chemickou reakcí, fotodisociací, rychlou expanzí plynu, průchodem svazku rychlých elektronů nebo opticky). Nejčastěji však excitace probíhá pomocí elektrického výboje ve zředěném plynu, ale efektivně se používá také příčné buzení elektrickým výbojem za vysokých tlaků, naopak jen zřídka se využívá optické buzení. Plynové lasery mají homogenní (stejnorodé) prostředí, díky kterým mají tyto lasery vynikající parametry, vysokou účinnost (přeměna elektrické energie ve výboj je hospodárnější), stabilitu a nízkou rozbíhavost svazku. Jelikož tyto lasery pracují v nepřetržitém režimu, není jejich trvalý výkon moc velký. Plynové lasery se ukázaly jako velmi perspektivní a mohutné zdroje infračerveného záření i ultrafialového záření a našly významné uplatnění v technologii (vrtání, řezání, svařování, obrábění, mikroobrábění, čištění, popisování), měřicí technice a medicíně. [3], [4], [19]

Atomární lasery: Aktivním prostředím těchto laserů jsou elektricky neutrální, v molekulách nevázané atomy.

- helium-neonový laser,
- měděný laser,
- jodový laser.

Iontové lasery: Aktivní prostředí těchto laserů je tvořeno ionty vzácných prvků nebo ionty par kovů (Sn, Pb, Zn, Cd, Se).

- argonový laser,
- helium-kadmiový laser.

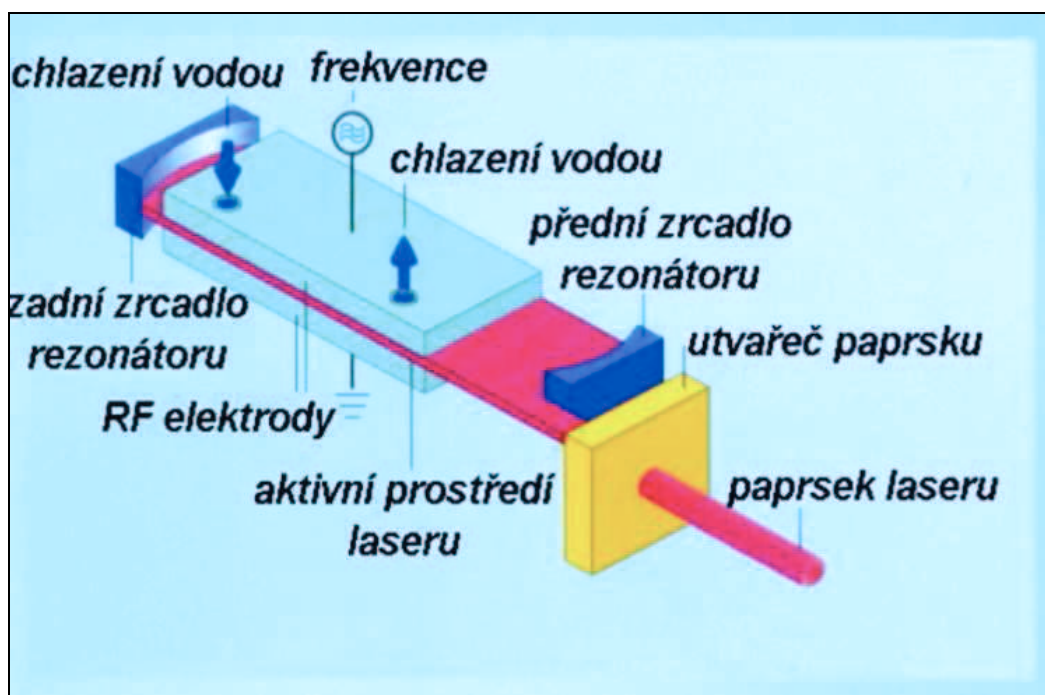
Molekulární lasery: Široké spektrum energetických hladin, je možné vytvářet inverzi populace hladin, což umožňuje generovat světlo (ultrafialové nebo viditelné).

- vodíkový laser,
- dusíkový laser,
- excimerové lasery,
- CO₂ laser.

2.2.1 CO₂ laser

Je jedním z nejstarších plynových laserů a stále nejpoužívanějším. V současné době je CO₂ laser nejsilnější kontinuální laser. Aktivní prostředí laseru buzené doutnavým elektrickým výbojem tvoří molekuly oxidu uhličitého (CO₂) a dalších plynů. Tyto plyny (dusík, vodík, helium) zlepšují podmínky vzniku inverzní populace. Vzájemné poměry těchto prvků se mohou u jednotlivých CO₂ laserů lišit. Ke vzniku stimulované emise záření se využívá kvantovo – energetické přechody související s oscilací molekul plynu CO₂ a dusíku N₂. Záření generované tímto typem laseru spadá do vzdálené infračervené oblasti (pro lidské oko není viditelné) s nejčastěji generovanou vlnovou délkou 9,4 a 10,6 μm, které je možno oddělit optickým hranolem. CO₂ lasery se vyznačují relativně vysokou účinností dosahující až 20 %. V současné době pouze CO₂ lasery zahrnují relativně široké rozmezí výkonů řádově až do 45 kW. Běžné průmyslové výkony CO₂ laserů se pohybují kolem 6 – 8 kW, v některých případech až 12 kW, proto patří mezi nejrozšířenější lasery. Nízkovýkonové typy jsou charakterizovány malými rozměry a velkou životností. Jejich výstupní výkony se pohybují v řádu 10 W. Výkony desítek až stovek wattů se generují systémy s několika metrů dlouhými, vodou chlazenými trubicemi, ve kterých proudí aktivní plyn. Výkony až desítek kilowattů se pak získávají ve velkoobjemových systémech, kde je nutné průtočné chlazení plynové směsi a vodou chlazená zrcadla, protože čočky nevydrží vyšší energii paprsku. Vyjma vysokého výkonu a velké účinnosti, exceluje CO₂ laser ještě slušnou kvalitou laserového svazku. Ostatní vlastnosti jsou již nežádoucího rázu. Záření o vlnové délce 10,6 μm neprochází optickými vlákny, je tedy nezbytné laserové záření do místa určení dopravit systémem zrcadel, to se příliš nehodí pro přesné obrábění. Vzhledem k malé objemové hustotě výkonu CO₂ laseru, vychází vysokovýkonové laserové systémy hodně velké a hmotné, zařízení není prakticky mobilní.

Je také závislé na přívodu chladicí kapaliny a na dodávce pracovní plynové směsi, která se často obnovuje kvůli spotřebě plynu. Její kvalita má největší vliv na kvalitu paprsku a jakákoliv nečistota by mohla poškodit optickou část rezonátoru. Plyn je proto nutné dodávat do okruhu z tlakové láhve. Vzhledem ke složitosti a provozní náročnosti vyžaduje takové zařízení nepřetržitou kontrolu a údržbu. Přes tyto nedostatky nemá díky dosahovaným maximálním výkonům CO₂ laser dostupnou konkurenci a drží si své místo především v oblastech, jako je svařování a řezání klasické legované nebo korozi-vzdorné oceli až do tloušťky 25 mm. [3], [4], [19]



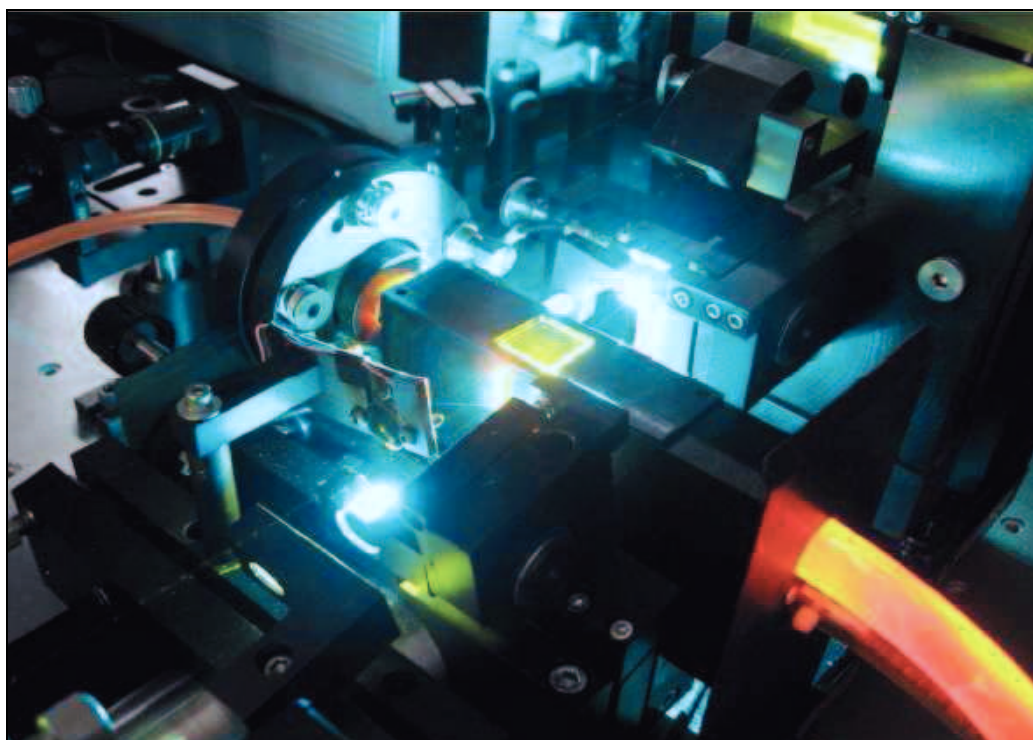
Obr. 2.3 Konstrukce CO₂ laseru [3]

2.3 Kapalinové lasery

U kapalinových laserů tvoří častěji aktivní prostředí roztoky organických barviv (Rhodamin 6G, Rhodamin B, Fluorescein, Alizarin, různé Coumariny a další, rozpuštěné například v lihu nebo destilované vodě). Výjimkou však byly lasery pracující s cheláty různých prvků vzácných zemin, které se objevily již v roce 1963. Organické barviva jsou komplexy organických sloučenin mající široké fluorescenční spektrum umožňující spojitě měnit vlnovou délku záření generovaného těmito lasery. Pomocí několika druhů barviv (až 200 druhů) a metod nelineární optiky lze dosáhnout prakticky všech vlnových délek (300 až 1500 nm). Pro buzení barvivových laserů se využívá optické záření, které může být koherentní nebo nekoherentní, pulsní nebo kontinuální, příčné nebo podélné. Zdrojem

budícího záření mohou být speciální výbojky – nekoherentní buzení nebo pomocný laser (argonový, dusíkový laser generující v oblasti UV) – koherentní buzení. Při buzení výbojkou se užívá podobného uspořádání jako u pevnolátkových laserů. V případě buzení laserem se může uspořádání lišit.

Typickým představitelem je rhodaminový laser generující pulsní záření od zelené až po červenou oblast spektra. K těmto kapalinovým laserům patří i lasery na barevných centrech, krystalech s různými defekty vyvolávajícími absorpci na různobarevných spektrálních čarách. Velká výhoda kapalinových barvivových laserů spočívá především v jejich laditelnosti (plynulá změna vlnové délky), z toho důvodu se používají hlavně ve spektroskopii a informační technice. Novou aplikací je využití těchto laserů v medicíně (fotodynamická terapie). Možnost naladění přesné vlnové délky způsobuje ničení rakovinotvorného nádoru. Podstatnou nevýhodou těchto laserů je toxicita a nepříliš dlouhá životnost aktivního prostředí, které se účinkem tepla a světla rozkládá. Ve většině případů dochází k nahrazení kapalinových laserů přeladitelnými pevnolátkovými lasery. [3], [9], [17]



Obr. 2.4 Rhodaminový laser [18]

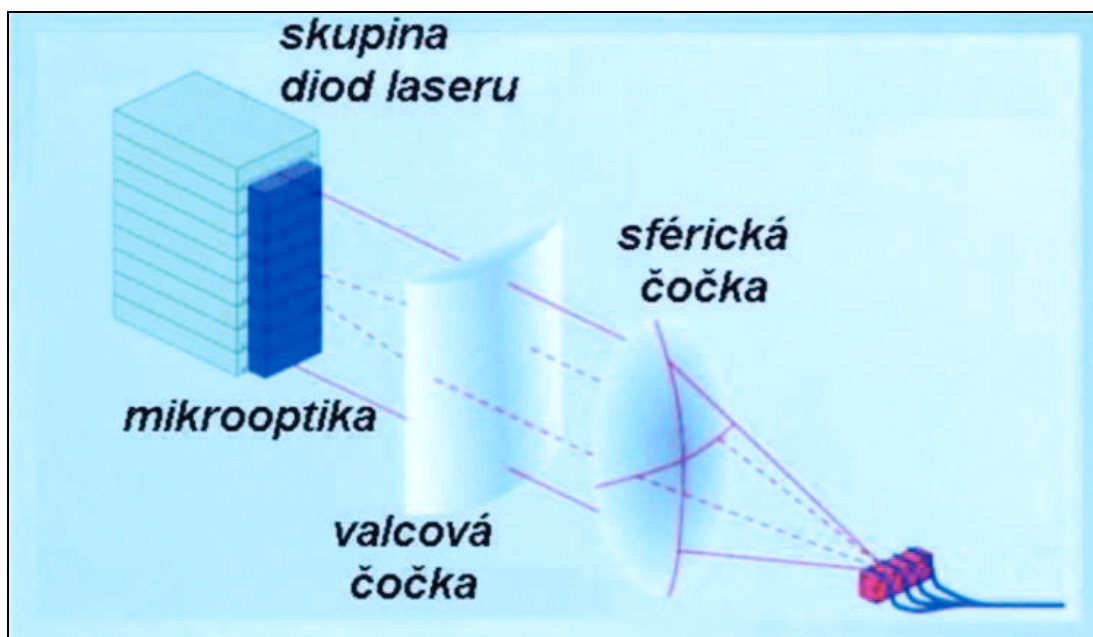
2.4 Polovodičové lasery

Polovodičové lasery jsou dnes vůbec nejrozšířenější lasery. Často se pro ně používá označení laserová dioda. Aktivním prostředím polovodičových laserů je polovodičový materiál, ve kterém jsou aktivními částicemi nerovnovážné elektrony a volné nosiče náboje, které mohou být injektovány (velké optické zesílení). Od ostatních laserů se liší tím, že nepracují s přechodem elektronů mezi energetickými hladinami, ale přechod se děje mezi dovolenými energetickými pásy polovodiče (vodivostní a valenční). Buzení se nejčastěji provádí elektrickým proudem (injekční polovodičový laser), tekoucím PN přechodem v propustném směru, elektronovým svazkem (polovodičový laser), lavinovým jevem, ale i opticky. Pracují v kontinuálním tak pulsním režimu. Hlavní předností polovodičových laserů je jejich kompaktnost, velká účinnost (až 50 %), možnost spektrálního přeladění v širokém spektrálním pásmu a pomocí výběru aktivního prostředí generace záření různých vlnových délek (300 až 30 000 nm). Laserový paprsek lze snadno měnit (modulovat) změnou budicího elektrického proudu, proto mohou mít polovodičové lasery výstupní výkon 30 W až 6 kW. Nevýhodou je rozbíhavost generovaného záření a velká závislost parametrů generovaného záření na teplotě aktivního polovodičového materiálu. Polovodičové lasery se používají pro svařování, tepelné zpracování, nanášení povlaků, řezání, popisování součástí a v technologiích Rapid Prototyping (3D tisk). [3], [4]

Typickými představiteli polovodičových laserů jsou: [4], [11]

- **polovodičový laser**, buzený svazkem elektronů, který má aktivní prostředí tvořené vlastním polovodičem (galium arsenidový GaAs, kadmium sulfidový CdS a kadmium selenidový CdSe). Tyto lasery jsou natolik závislé na teplotě, že mohou generovat záření pouze při nízkých teplotách (80 K).
- **injekční polovodičový laser**, buzený elektrickým polem má ve většině případů aktivní materiál složený z polovodiče typu P a N (přechod kov – polovodič), buzení se provádí přiložením elektrického pole k polovodičovému přechodu. Za vhodných podmínek se může část elektrické energie přeměnit na světlo. Tento jev se využívá u luminiscenčních svítivých diod LED, laserových ukazovátek, počítačové techniky.

- zvláštní skupinu tvoří tzv. **vysoce výkonné diodové lasery** (HDL – High power diode laser), které jsou teprve na začátku průmyslového využívání. Mají vynikající elektrickou účinností (25 až 30 %), neboť přeměňují elektrický proud přímo na světelné záření o vlnové délce 800 až 900 nm. Tvar vystupujícího paprsku může být obdélníkový, čtvercový a kruhový o průměru 1,5 mm.



Obr. 2.5 Konstrukce polovodičového laseru [3]

2.5 Plazmatické lasery

V plazmatickém laseru je inverze populace vytvářena uvnitř chladnacího plazmatu. Experimentálně bylo realizováno mnoho plazmatických laserů s rozsáhlým spektrem vlnových délek. Nejvyšší součinitel zisku při laserových přechodech byl pozorován u laserů používající ionty argonu 747 nm, ionty kadmia 537,8 nm a ionty rtuti s vlnovou délkou 567 nm. Obecně plazma nemusí být vytvářena elektrickým výbojem, ale jde to i elektronovým svazkem, chemickými reakcemi či produkty jaderných reakcí. Plazmatické lasery s aktivním prostředím vytvořeným mnohonásobně nabitými ionty jsou jednou z cest k vytvoření rentgenového laseru, který je zdrojem koherentního rentgenového záření. [11], [24]

2.6 Nové druhy laserů

Přestože lasery a laserové technologie prošli mnoha změnami, při kterých dosahovaly vynikajících výsledků, není jejich vývoj zdaleka u konce. Kromě výše uvedených typů laserů se v některých speciálních aplikacích používají i jiné laserové systémy. K rozvoji laserové techniky dochází od 90. let minulého století dodnes. Za tu dobu vznikla celá škála nových technologických variant: [3]

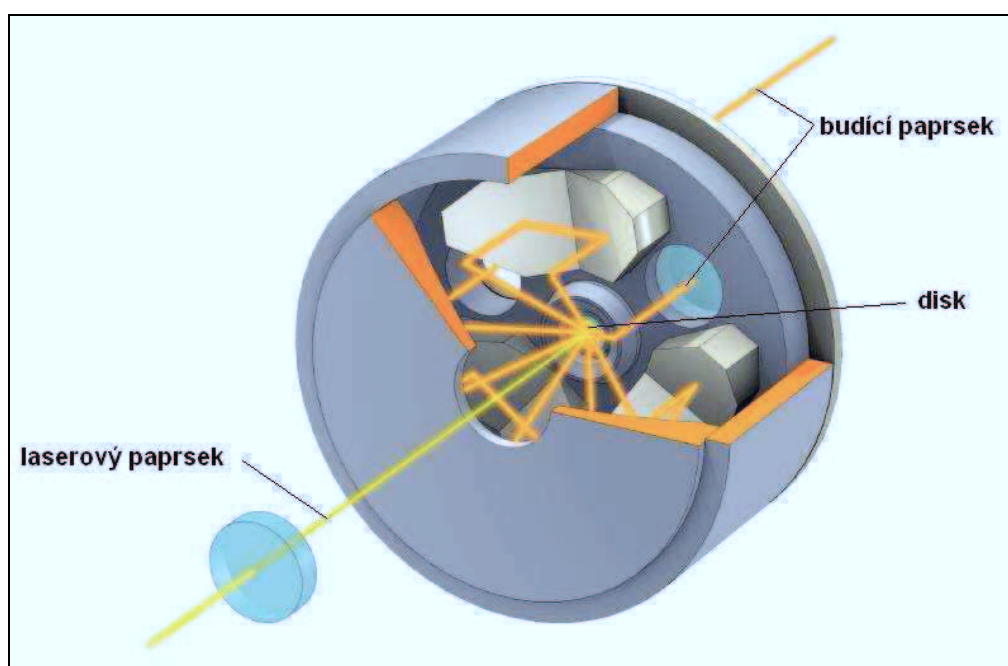
- CO₂ lasery s deskovou nebo koaxiální formou elektrod,
- u pevnolátkových typů lasery s deskovou formou krystalu,
- diskové lasery s aktivním médiem ve tvaru tenkého kotouče,
- polovodičové lasery,
- výkonové vláknové lasery.

2.6.1 Vláknové lasery

Vláknové lasery po letech intenzivního vývoje začínají významně zasahovat do praxe, kde mohou znamenat zásadní zvrat u dosavadních technologií a být perspektivní volbou k pevnolátkovému Nd:YAG laseru a plynovému CO₂ laseru. Vláknové lasery generují při čerpání výkonnými diodovými lasery vlastní záření teprve uvnitř optického vlákna. Tyto křemenná vlákna dopovaná prvky vzácných zemin (Yterbium, Erbium, Neodym) tvoří aktivní prostředí vláknových laserů. Optické vlákno těchto laserů v podstatě odpovídá svou funkcí úloze krystalu, používaného u pevnolátkových laserů. Vláknové lasery pracují v kontinuálním režimu a vyzařují záření na vlnových délkách od 1000 do 1500 nm. Přitom excelují dobrou kvalitou laserového paprsku, vysokou životností, účinností a nízkou pořizovací cenou. V dnešní době jsou dostupné vláknové lasery s výkonem 2 až 4 kW, ale existují systémy, které využívají paralelního spřažení velkého množství nízkovýkonových laserů, přičemž se výsledný generovaný výkon může pohybovat od stovek wattů až po desítky kW. Kromě nízké spotřeby elektrické energie a vysoké účinnosti vynikají tyto lasery malou hmotností, vysokou spolehlivostí a kvalitou laserového svazku. Lze očekávat, že tyto lasery mohou být v nejbližších letech zdrojem mnoha překvapení a nového využití (vysokorychlostní svařování). [4], [23], [24]

2.6.2 Kotoučový laser

Novinkou u pevnolátkových laserů vyvíjenou v posledních letech se staly kotoučové lasery. Aktivní krystal kotoučových laserů je na rozdíl od klasických pevnolátkových laserů s válcovitou formou krystalu tentokrát ve tvaru tenkého kotouče o tloušťce desetin mm a průměru až 100 mm. Pro čerpání aktivního média je u kotoučových laserů podstatný vícenásobný přechod záření od laserové diody přes reflektující vrstvy jedné strany kotouče a okolních reflektorů viz obr. Pracují v pulsním i kontinuálním režimu s účinnosti dosahující až 91 %. Rychlý vývoj těchto laserů přinesl od původních 1 kW typů dnes už výkon 8 kW a nic nebrání jejich dalšímu zvyšování. Vyšší výkon kotoučových laserů nám umožňuje pro pracovní operace volit větší vzdálenost hlavice laseru od obrobku. Teplo, které u kotoučových laserů vzniká stejně jako u jiných typů laserů, je odváděno napojením druhé strany kotouče na kontaktní chladič. Pro chlazení kotoučových laserů se používá především vzduch. Malá tloušťka kotouče krystalu a přitom dostatečná velikost přechodu tepla ve směru paralelním s výstupním paprskem příznivě působí na intenzitu chlazení a homogenní rozdělení teploty uvnitř paprsku. Za krátkou dobu od uvedení na trh si kotoučové lasery oblíbila již řada předních automobilek (Audi, DaimlerChrysler), kde je používají ve spojení s roboty pro svařování skeletů karoserií, vrtání mikrootvorů a mikrořezání (snížení tepelně ovlivněné oblasti řezu nebo svaru). [3], [24]



Obr. 2.6 Princip kotoučového laseru [21]

3. Laser a jeho aplikace

Laser je obdivuhodné a neobyčejně univerzální zařízení, které se již desítky let neodmyslitelně řadí mezi nekonvenční průmyslové technologie. Je schopen měnit prakticky jakýkoli druh energie na energii koherentního elektromagnetického záření. Volbou vhodného aktivního prostředí je možno získat záření nejrozličnějších vlnových délek v oboru infračerveného, viditelného i ultrafialového světla. I když se u některých typů laserů přeměňuje energie s poměrně malou účinností, je tento nedostatek bohatě nahrazen vysokou kvalitou laserového světla. Tím laserová technika zasahuje prakticky do většiny oborů lidských činností. Bez ohledu na použití nenabízí žádný jiný zdroj záření tuto výjimečnou kvalitu a proto se stává laser jedním z nejužitečnějších nástrojů dneška.

Aplikace laseru resp. laserového svazku se odvíjí především od jeho vlastností, a to zejména ve strojírenství, elektrotechnice a elektronice, telekomunikační technice, informatice, výzkumu kosmu, jaderném výzkumu, zemědělství, biologii, chemii, meteorologii, metrologii, lékařství, lehkém průmyslu, v základním i aplikovaném výzkumu. Další rozvoj a nasazení laserů úzce souvisí se zlepšováním technicko ekonomických parametrů, provozními vlastnostmi laserů, jejich životností, spolehlivostí, účinností a efektivností. Objevují se stále nové druhy laserových zdrojů a příslušných doplňujících komponentů a zařízení, které umožňují další rozšíření aplikací.

3.1 Průmysl

Trendem současné doby je rychlost, která se nepřímo projevuje i ve výrobě. Rostoucí požadavky na zvyšování kvality a efektivity měly za následek nasazení laserů do výroby. Bez ohledu na jeho použití představuje laser precizní a jednoduchý nástroj na opracování bez nutnosti mechanického kontaktu s obrobkem (opracování na dálku, v ochranné atmosféře). Ve výrobním procesu se řadí mezi nejprogresivnější způsoby působení člověka na materiál. Vyznačuje se snadnějším opracováním obtížně dostupných částí materiálu, technologickým zpracováním těžkoobrobitelných materiálů, což výrazně zvyšuje kvalitu, technickou úroveň a produktivitu práce. V porovnání s dosavadními technologiemi laser převyšuje ve všech důležitých aspektech výroby (výkonnost, přesnost, flexibilita). [3], [11]

Mezi základní oblasti, ve kterých se uplatňuje laser v průmyslu, patří: [4]

- svařování,
- obrábění (vrtání a řezání),
- tepelné zpracování.

3.1.1 Svařování laserem

Svařování je jednou z metod, při které dochází ke spojování materiálů. Laser při svařování využívá optického záření k roztavení materiálu do požadované hloubky s minimálním odpařením povrchu. Při tom vzniká kapilára vyplněná parami kovu pod vysokým tlakem. Páry kovů jsou vysokou teplotou ionizovány a tato laserem indukovaná plazma tryská vysokou rychlostí z místa svaru. Ve výsledku právě tento proces může způsobit lokální natavení nebo odpaření materiálu. V praxi se nejčastěji používají kontinuálně běžící lasery generující vlnovou délku ležící v infračervené oblasti spektra u CO₂ (10,6 μm) a Nd:YAG laseru (1,06 μm). Proces laserového svařování vyžaduje ve srovnání s jinými metodami menší intenzitu záření optického svazku a větší délku laserového impulsu. Výkon laseru pro svařování se nejčastěji pohybuje od 0,5 do 9 kW, přičemž v ohnisku fokusovaného paprsku o průměru 0,5 mm a menším dosahuje koncentrace výkonu až 10¹² W.cm⁻². Vlivem mnohonásobně rychlejšího ohřevu, než je odvod tepla okolím, dochází pouze k lokálnímu ohřevu materiálu, z čehož vyplývají výhody jako štíhlost svaru a malá teplotně ovlivněná oblast. [5], [21], [23]

Mezi další výhody sváření laserem patří:

- absence fyzického kontaktu s elektrodou,
- lokalizovaný ohřev a rychlé chladnutí,
- schopnost svářet různorodé materiály – s vysokým bodem tání, odrazivé materiály a geometrie (mikrosvary, nepřístupná místa),
- vysoká pevnost a kvalita svaru.

Vhodnost použití laserového svařování je u automatizovaných procesů, a to z hlediska kvalitativního i kvantitativního. Dnes se toho využívá při svařování kardiostimulátorů, kontaktů v elektronice, svařování plechů v automobilismu, letectví a kosmonautice. [5], [21], [23]

Laserové svařování rozdělujeme na dva typy: [5], [21]

- **kondukční svařování:** k tomuto procesu se používá krátkých impulsů Nd:YAG laseru. Laserový paprsek materiál roztavuje pouze na povrchu a díky tomu se v materiálu vytváří svar hluboký pouze několik desetin milimetru (fólie a tenké plechy).
- **hluboké svařování „Key hole“:** u této technologie svařování se používají CO₂ lasery. Při svařování vzniká v materiálu hluboká, úzká dutina (klíčová díрка), za kterou roztavený kov rychle krystalizuje a vzniká tak svarový spoj. Díky tomu se můžou svařovat větší šířky materiálů bez použití přídavného materiálu. Použitím asistenčního plynu se zabráňuje oxidaci a pórovitosti v místě svaru. Tento svar je pak velmi kvalitní, celistvý a neobsahuje cizí příměsi. Pro svařování relativně tlustých dílů (převodovek, profilů, tlustostěnných trubek).

3.1.2 Vrtání a řezání laserem

Vrtání a řezání laserem jsou velmi podobné metody založené na odstraňování materiálu odpařováním. Teplo potřebné pro odpařování dodává fokusovaný laserový svazek o velké hustotě výkonu. Při vrtání se využívá i ablace. Je to děj, při kterém dochází odstranění materiálu z řezu silovým účinkem laseru, aniž by došlo k jeho odpaření. Ze vznikajícího otvoru je materiál odstraňován v kapalném stavu a jen malá část materiálu ze středu paprsku vypařením. Intenzita záření optického svazku je mnohem vyšší než u svařování. Využívá se proto pulsních laserů s délkou pulsu menší než 1 ms. Předností laserového vrtání je vytváření malých otvorů o průměru od 10 do 100 μm i v těžce dostupných místech, kde je to pomocí jiných metod obtížné nebo nemožné. Díry mohou být kruhové nebo tvarové a můžou dosahovat délky až 50 mm. U takových děr platí, že čím je díra delší, tím více se odchyluje tvar díry od geometrie, což způsobuje rozdělení energie laserového svazku. Při vrtání hlubokých otvorů laserem, zůstává natavený materiál v otvoru, kde se hromadí a rozstříkuje po stěnách. Pro kvalitnější díry se proto používají krátké doby pulzu. Samotné zkrácení pulzu však nestačí, musí se vybrat i vhodná metoda

vrtání (jednotlivé pulsy, opakované pulsy, vyřezání díry, laserovou erozí), čímž se zlepší odstraňování odtavovaného materiálu. [3], [5], [24]

V současné době se pro laserové vrtání nejčastěji využívají pevnolátkové lasery (Nd:YAG, Nd:sklo) o výkonu 100 až 500 W a CO₂ lasery. Nejvyšších děr však dosáhneme použitím Nd:YAG laseru čerpaného diodami, neboť má lépe stabilizovaný paprsek (doba pulsu 10 ns). Vrtat lze široké spektrum materiálů jako jsou kovy, plasty, textilie, dřevo, sklo, keramiku a jiné přírodní materiály. Používá se pro vrtání kamenů do hodiněk, filtrů, vstřikovacích trysek, lopatek proudových motorů. [5]

3.1.3 Tepelné zpracování laserem

Tepelné zpracování kovů laserem je charakterizováno krátkou dobou ohřevu na teplotu nižší než je teplota solidu a malým objemem ohřátého materiálu. Míra tepelného ovlivnění materiálu je dána hustotou dopadajícího svazku laserového záření a dobou jeho působení. V porovnání s jinými metodami je výhodou možnost lokalizovaného tepelného zpracování i na nepřístupných místech a malá deformace výrobků.

Metody tepelného zpracování jsou založeny na: [5]

- **ohřevu materiálu** – žíhání, kalení a popouštění,
- **tavení materiálu povrchu součásti** – tepelné zpevnění s natavením a amorfizace povrchu,
- **odpařování materiálu** – rázové zpevnění, založené na mechanismu vypařování.

Kalení laserem je tepelné zpracování kovů, využívající k jejich rychlému ohřevu optické záření laserů. Použitelné je u ocelí a slitin o obsahu uhlíku větším než 0,3 %, které jsou kalitelné i obvyklými kalicími metodami. V průmyslu se zpravidla používají kontinuální CO₂ lasery o výkonu několika tisíc wattů (transformační zpevňování automobilových součástí). Pro prohřátí celého povrchu oceli se používají CO₂ lasery s výkonem několika kW. Při laserovém kalení povrchových vrstev se zahřeje funkční plocha laserem ve velmi krátké době na kalicí teplotu. Následuje chlazení (vedením tepla v materiálu, externě) kritickou nebo nadkritickou rychlostí, po které je materiál za místem ohřevu dokonale zakalen a jeho povrch se vyznačuje jemnou martenzitovou strukturou.

Velmi výhodné je použití vysoce výkonových diodových laserů vzhledem ke tvaru emitovaného laserového svazku (čtverec, obdélník), jejich účinnosti a rozdělení energie záření v průřezu svazku. Při kvalitním provedení tepelného zpracování součástí laserem dochází k prodloužení jejich životnosti o více jak dvojnásobek. Jedná se o vodící plochy, vnitřní dosedací plochy, torzní pružiny, klikové a vačkové hřídele. [3], [5], [24]

3.1.4 Ostatní metody použití laseru v průmyslu

Do tohoto odvětví patří dnes mnoho nových oborů zahrnujících laserové aplikace např. značení a gravírování, povrchové úpravy a ve světě se slibně rozvíjející podpora konvenčního obrábění. Každá z těchto oblastí má svá specifika, pokud jde o typ laseru a způsoby jeho užití. [5], [11], [24]

- **značení a popisování laserem** – je založeno na místním odpaření materiálu nebo na změně barvy jeho povrchu. Laserový paprsek vytváří na povrchu materiálu s vysokou přesností stálý, mechanicky odolný, kontrastní a jinak nenapodobitelný popis. Pro tuto aplikaci se používají výkonové impulsní tak i kontinuální CO₂, Nd:YAG a excimerové lasery.
- **gravírování laserem** – pracuje na stejném principu jako popisování, ale změnou parametrů laseru lze spojitě přecházet od povrchového popisu v několika mikronové hloubce materiálu až po laserové gravírování do větších hloubek. Gravírování se používá pro vytváření jednoduchých i velmi složitých reliéfů, především do kalených ocelí (formy pro stříkání plastů, zápustek), keramických materiálů, dřeva, gumy. Pro gravírování do kovových a keramických materiálů se používají především Nd:YAG lasery, pro gravírování do dřeva a gumy jsou vhodné CO₂ lasery.
- **soustružení a frézování pomocí laseru** – představuje slibnou alternativu oproti konvenčním technologiím. Nabízejí pozoruhodné možnosti laserového přesného mikroobrábění nejrůznějších materiálů (keramika, sklo, polymery, různé kovy i magnetické). Pro soustružení a frézování obrobků s využitím laseru se používá obrábění s předehřevem, odtavování materiálu z povrchu obrobku a odřezávání materiálu dvěma různoběžnými paprsky laseru. Používají se k tomu CO₂ a Nd:YAG lasery o výstupním výkonu 500 až 2 500 W.

- **povrchové úpravy** – se používají k čištění nebo leštění povrchu materiálu většinou pomocí pulsních Nd:YAG laserů. Čištění laserem se jeví jako vhodná náhrada čistících metod založených na použití chemických rozpouštědel a mechanických metod. Dobrých výsledků se dosáhlo především při leštění tvářecích nástrojů a forem na zpracování skla a plastů, u kterých drsnost funkčních ploch dosahuje přibližně 0,1 až 0,2 μm . Pomocí laseru lze také nanášet na povrch materiálu různé povlaky (kov, keramika).

3.2 Další aplikace laseru

- **medicína** – rozsah použití laseru v současné medicíně je velmi široký a jeho aplikací stále přibývá. Pro lékaře je zvláště cenná možnost koncentrace energie záření na miniaturní plochu, řezání a odpařování tkání, kdy se laserová energie ve tkáních pohlcuje a mění na teplo (laserová chirurgie). Při laserových operacích nedochází k dotyku s tkání, výsledkem je ostře ohraničený řez bez poškození okolí a žádná infekce. Současně s řezem dochází ve tkáni ke koagulaci (teplem se uzavřou konce cév, takže rána mnohem méně krvácí). Rozvoj vláknové optiky umožnil přenos laserového záření optickými vlákny i do různých vnitřních orgánů.
- **měřicí technika** – laser se používá v oblasti astronomie, geodézie a geofyziky pro měření vzdálenosti na principu odrazu světla od předmětu a jeho času návratu při rychlosti světla. Doba, která uplyne mezi vysláním impulzu a přijetím odraženého impulzu, je úměrná vzdálenosti překážky. Těchto laserových systémů se využívá pro určování drah družic, pohybu kontinentů a při studii zemětřesení. Lasery našly uplatnění mimo jiné také v ekologii a metrologii, kde jako pozemní radary – Lidary slouží k měření částic v ovzduší. K měření se zde využívá nejen odrazu, ale i rozptylu. Po vyhodnocení se dá určit znečištění ovzduší, směr pohybu částic, výška oblačnosti a proudění vzduchu v atmosféře.
- **vojenská aplikace** – laser se ve vojenství využívá především k zaměřování a označování cílů. Laserové zaměřovače se nacházejí na zbraních, které mohou poté viditelně označit cíl až na vzdálenost 20 m. Laserové dálkoměry slouží k přesnému změření vzdálenosti cíle, jeho polohy a stanovit optimální balistickou dráhu střely. Laser se dá taktéž využít přímo ke zničení cíle laserovým svazkem, ale musel by mít obrovskou energii. [9], [12], [24]

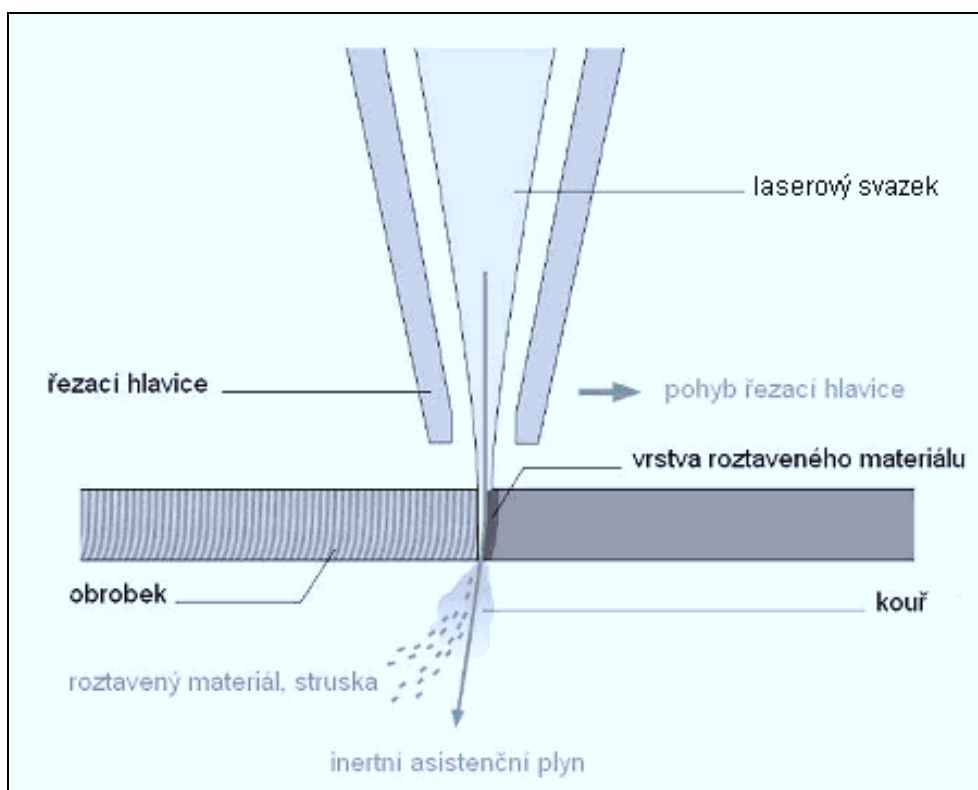
4. Tepelné dělení

Tepelné dělení materiálů je v rámci strojírenské výroby stále velmi důležitou nepominutelnou výrobní operací. Používá se k tomu celá řada metod, které lze zařadit mezi operace přípravy materiálu. Jednotlivé metody si vytvořily svoji oblast optimálního použití dle normy ČSN EN ISO 9013, stanovující požadavky na klasifikaci výrobků a řezů při použití různých metod tepelného dělení. Současně tato norma stanovuje geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu. Tyto metody využívají soustředěné tepelné energie působící v místě řezu, při které vznikají pouze minimální deformace při vlastním procesu dělení i po jeho ukončení. Proto je možné dělit materiály velmi přesně a to i materiály velmi lehce deformovatelné nebo křehké. Podmínkou řezatelnosti je, aby zápalná teplota materiálu byla menší než je jeho teplota tavení. Obecně tak lze tepelné dělení materiálů aplikovat na celou škálu konstrukčních materiálů jako jsou nelegované a nízkolegované oceli, vysokolegované oceli a slitiny na bázi niklu, neželezné kovy a jejich slitiny (hliník, měď), vysoce reaktivní materiály a jejich slitiny citlivé na kyslík (hořčík, titan), nekovové materiály (plasty, kompozity, dřevo, papír, sklo). Největší zastoupení zaujímá technologie řezání, pracující na principech lokálního tavení, spalování nebo odpařování, případně kombinace těchto jevů, kdy energie potřebná k inicializaci procesu a jeho průběhu je dodávána různými tepelnými zdroji. Řezání za pomoci elektrického oblouku umožnilo dále řezat všechny elektricky vodivé materiály. S nástupem laserových technologií přišla možnost tepelného dělení prakticky jakéhokoliv druhu materiálu včetně elektricky nevodivých a materiálů s extrémně vysokou afinitou ke kyslíku nebo dusíku, jako je titan nebo zirkonium v inertní ochranné atmosféře. V průmyslové praxi jsou používány tři základní metody tepelného řezání materiálu kyslíkem (tloušťky 3 – 300 mm), plazmou (tloušťky 0,5 – 160 mm) a laserem (tloušťky 0,5 – 40 mm). [3], [8], [22]

4.1 Laserová technologie řezání

V dnešní době laser ovládl mechanickou výrobu a stal se standardním nástrojem v oblasti dělení materiálu. Jeho technologické využití představuje především obrábění a opracování materiálů, založené na využití schopnosti výkonných laserů koncentrovat energii optického záření v prostoru, čase i spektrálním intervalu a na interakci záření s látkou. Lasery mohou dodávat velký výkon záření v kontinuálním režimu (desítky kilowatů) i vysoký střední výkon v pulsním režimu, kdy mohou být generovány impulsy

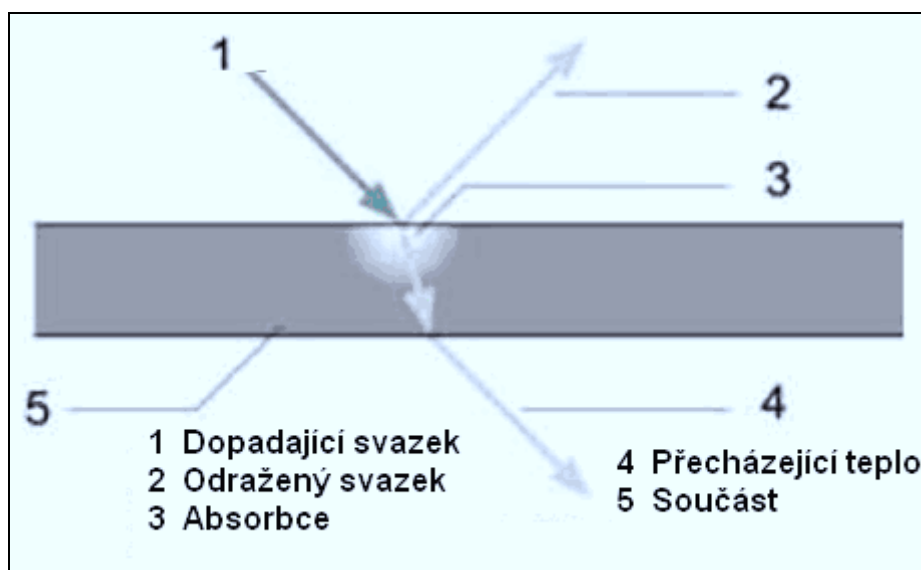
s přesně určenou délkou a velikostí energie. Tyto lasery potom generují záření monochromatické a koherentní, které lze jednoduchou čočkou či soustavou zrcadel fokusovat. Takto fokusovaný optický svazek lze soustředit na velmi malé plochy o průměru 10 až 100 μm . Přitom dosahuje ohromné hustoty energie a mimořádně vysoké teploty, takže při interakci s materiálem dochází nejprve k jejímu ohřevu, tavení ($I = 10^6$ až 10^7 W.cm^{-2}) a nakonec odpaření ($I = 10^8$ až $10^{12} \text{ W.cm}^{-2}$) za velmi krátký čas, proto se nestačí uplatnit pomalé procesy vedení a sálání tepla. Je tedy možné pomocí záření z výkonového laseru ohřívat tenké povrchové vrstvy nebo odpařovat materiál bez ovlivnění jeho vnitřní struktury jako u žádné jiné metody. Energie záření je navíc dokonale „sterilní“, nepřináší do ohřívaného místa žádné nečistoty ani příměsi, ohřev lze realizovat ve vakuu a je ho možno velmi rychle zahájit i ukončit. Technologie laserového řezání materiálů (kovových i nekovových) je vhodná pro tvarově velmi náročné výrobky z plochých polotovarů, kde rozměr nejmenších substruktur (děr, drážek, vřezů) je roven alespoň přibližně tloušťce zpracovávaného polotovaru. Z ekonomického hlediska je dělení materiálů laserem konkurenceschopné ve srovnání s ostatními technologiemi dělení materiálů. [11], [21], [25]



Obr. 4.1 Řezání laserem [21]

4.2 Interakce záření s materiálem

Při interakci laserového záření s povrchem kovového materiálu dochází postupně k několika fyzikálním procesům (absorpce – pohlcování, reflexe – odrazivost, rozptyl a transmittance). Záření generované laserem, které není odraženo, nebo neprojde materiálem bez účinku, se absorbuje do povrchu obráběného materiálu. Výsledkem je zvýšení kmitavé energie molekul, což vede k ohřátí materiálu a zvýšení absorptivity. Ohřátí je lokálního charakteru a dochází tedy pouze k ohřátí malého objemu materiálu na tavicí, vypařovací nebo sublimační teplotu (pevná látka se mění na plyn). [21]



Obr. 4.2 Interakce laserového záření [21]

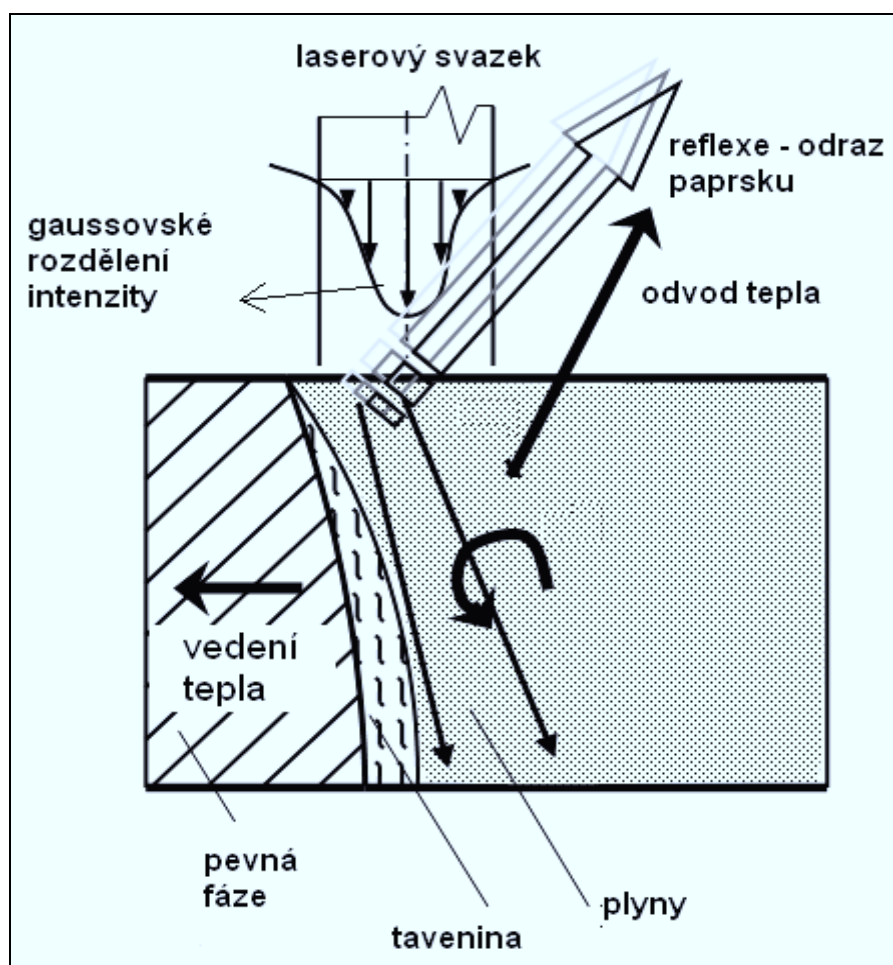
Absorpce (pohlcování) laserového záření výrazně závisí na teplotě a vlnové délce laserového záření (čím vyšší vlnová délka, tím je absorpce nižší). Pohlcená část záření proniká do povrchové vrstvy materiálu, přičemž hloubka průniku závisí na výkonu zdroje, vodivosti materiálu (s rostoucí teplotou klesá) a frekvenci záření. V praxi má však na hodnotu absorpce vliv i stav povrchu (lesklý, pískovaný).

Tab. 4.1 Součinitel odrazivosti některých kovů.

Materiál	Vlnová délka λ (μm)		
	0,7	1,06	10,6
Hliník	0,87	0,93	0,97
Chrom	0,56	0,58	0,93
Měď	0,82	0,91	0,98
Nikl	0,68	0,75	0,95
Stříbro	0,95	0,97	0,99
Ocel	0,58	0,63	0,93

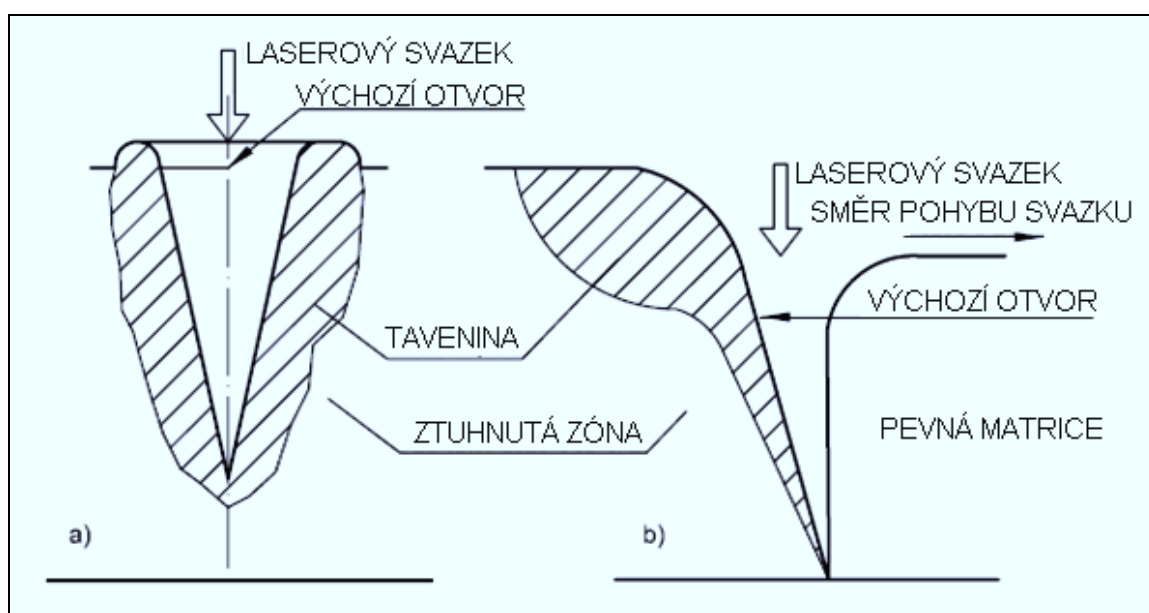
4.3 Proces řezání

Laserové řezání je technologie tepelného dělení materiálu, která je díky svému masivnímu rozšíření v současné době nejpoužívanějším využitím laseru v průmyslové výrobě. Řezný proces probíhá na základě vzájemného působení laserového svazku, řezného plynu a řezaného materiálu. Využívá při tom vysokou koncentraci energie produkovanou laserovým zářením, která umožňuje dělit všechny technické materiály, bez ohledu na jejich tepelné, fyzikální a chemické vlastnosti vysokou rychlostí, čímž je zabezpečena vysoká produktivita práce. Laserový svazek vycházející z rezonátoru laseru má velmi malý úhel otevření, jehož rozdělení hustoty energie při dispozici TEM provozu odpovídá Gaussově křivce (základní mód). Potom je pomocí speciální čočky zaostřen (fokusován) na povrch materiálu a způsobuje jeho natavení. Když laserový svazek s určitou hustotou výkonu ozáří povrch materiálu, tak je částečně odražen a z části se absorbuje do materiálu. Absorbované paprsky lokálně ohřívají částice materiálu až na teplotu tavení. [2]



Obr. 4.3 Procesy probíhající při řezání materiálu laserem [2]

Povrch natavené oblasti se rychle rozšiřuje a materiál se dalším intenzivním působením laserového svazku začíná odpařovat. V natavené zóně při odpařování částic vznikají poměrně vysoké tlaky a tavenina je přemísťovaná a vytlačovaná ze vznikajícího otvoru tlakem páry. V místě dopadu paprsku se vlivem toho vytváří malý otvor a laserový paprsek může pronikat hlouběji do otvoru. Příčný řez na obr. 4.4 a) ukazuje, že roztavený materiál je vytlačován na obě strany. V podélném řezu na obr. 4.4 b) je materiál tlačeny dozadu za pohybující se paprsek. Z fyzikálního hlediska jsou známy tři způsoby vytváření řezné spáry (pomocí spalování materiálu, jeho odtavení a vyfukování taveniny z místa řezu a odpaření materiálu). Šířky řezné spáry se pohybují od 0,02 do 0,5 mm. [2]



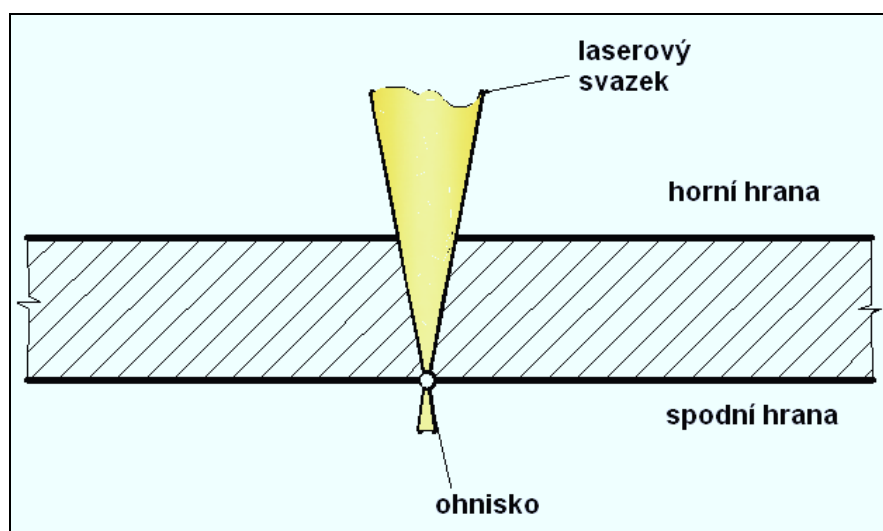
Obr. 4.4 Chování materiálu při působení laserového svazku

a) příčný řez; b) podélný řez [2]

Laserové řezání se využívá především u materiálů s malou tepelnou vodivostí. Snahou je odpařit materiál co nejrychleji při zachování co nejmenší oblasti zasažené tepelnými účinky. S tím souvisí i vysoká kvalita řezné hrany. Pro dělení materiálu se dnes stále ještě nejčastěji používají výkonové plynové CO₂ lasery a pevnolátkové Nd:YAG lasery, ale své místo nacházejí už i výkonové diodové a excimerové lasery. Řezání pomocí laseru má široké možnosti využití jak pro malosériovou výrobu, tak i pro velkosériovou výrobu v dávkách. Jako jedna z nesmírných výhod řezání laserem se ukazuje použití vyřezaných dílů díky své kvalitě, už i jako finálních výrobků (odpadá kalibrování otvorů a tvarů, odstraňování otřepů). V závislosti na použitém řezném plynu můžeme metody řezání rozdělit na tavné, oxidační, sublimační, vzduchem. [7]

4.3.1 Tavné řezání laserem

U tavného řezání je dělený materiál lokálně nataven laserovým svazkem. Vzniklá tavenina se od základního materiálu odděluje proudem vysoce chemicky čistého inertního (asistenčního) plynu, který se do místa řezu přivádí, ale na vlastním procesu řezání se nepodílí. V porovnání s ostatními metodami řezání laserem lze u tohoto způsobu docílit jen nižší řezné rychlosti. Maximální řezná rychlost je ovlivněna výkonem laseru, tloušťkou řezaného materiálu a teplotou při řezání. Přitom je laserový svazek jen velmi málo absorbován. Vlivem kvalitního povrchu řezu je tento způsob vhodný především pro vytvoření nezoxidovaných řezů kovových materiálů (nerezových ocelí, hliníku, mosazi, mědi a pozinkovaných plechů). Čistota použitého inertního plynu (dusík) má vliv na kvalitu řezné plochy a její finální úpravy. Vysoké požadavky na čistotu dusíku zaručují absenci vzniku oxidace a koroze materiálu v místě řezu. Ušlechtilé materiály jako titan nebo zirkon můžou být řezány jedině za pomoci absolutně nereaktivního plynu (argon). [22], [24]

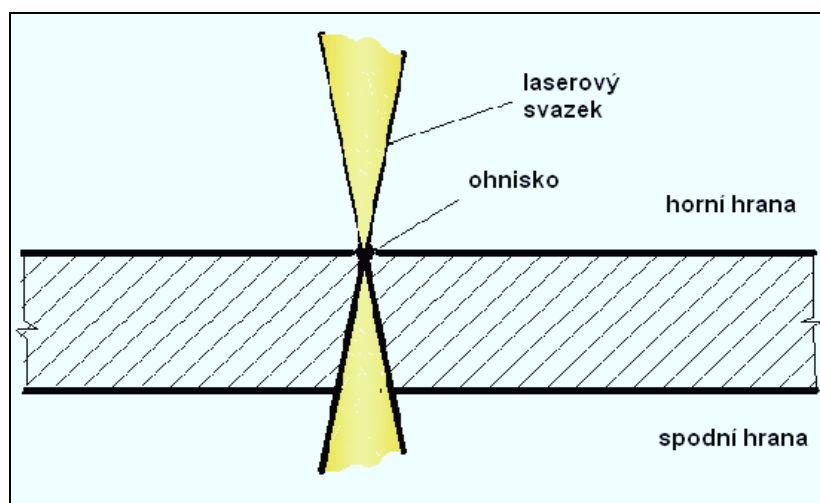


Obr. 4.5 Tavné řezání [26]

4.3.2 Sublimační řezání laserem

Při sublimačním způsobu řezání, se materiál odpařuje přímo v místě řezu bez nutnosti použití asistenčního plynu. Z důvodu minimalizace tavné zóny, která vzniká na hraně řezu, je nutno přivádět laserový svazek s vysokou hustotou energie. Sublimační řezání vyžaduje pečlivé nastavení optiky v závislosti na tloušťce řezaného materiálu, která musí být zároveň menší než průměr paprsku, jinak by páry materiálu znovu zkondenzovaly a svařily řez. Tato omezení ovšem platí pro materiály, u nichž vzniká tekutá fáze (neplatí

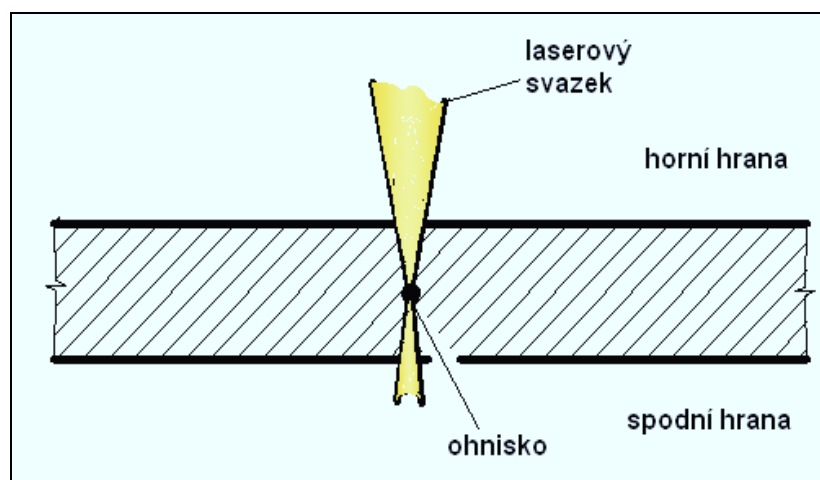
pro dřevo a keramiku). Maximální řezná rychlost je nepřímo úměrná odpařovacímu teplu materiálu a přímo úměrná rychlosti proudění řezného plynu. [22], [24]



Obr. 4.6 Sublimační řezání [26]

4.3.3 Oxidační řezání laserem

Oxidační řezání laserem se liší od tavného řezání použitím kyslíku jako reaktivního (řezného) plynu. Vzájemným účinkem kyslíku s roztaveným povrchem kovu vzniká exotermní reakce, která dále ohřívá materiál, čímž usnadňuje tavení a odfukování nataveného materiálu (strusky). Díky tomuto jevu je oxidační řezání rychlejší než tavné, ale dosahuje horší kvality povrchu řezu, širšího tepelně ovlivněného pásma a širší řezné spáry. Proto tato metoda není vhodná pro přesné výpalky a ostré geometrické tvary. Pro zlepšení kvality řezu se využívá přechod na pulsní režim nebo regulace výkonu laseru. Oxidačním řezáním se dělí především nízkolegované a nelegované oceli, které nejsou tak náchylné na oxidaci jako vysokolegované oceli. [22], [24]



Obr.4.7 Oxidační řezání [26]

4.3.4 Laserové řezání s podporou vzduchu

Tento způsob řezání laserem je hybrid, který leží mezi tavným a oxidačním řezáním. Jako asistenční plyn se používá vzduch, který má složení cca 21 % O₂, 78 % N₂ a další prvky. Tato metoda je cenově výhodnější, protože odpadá složitá výroba stlačeného vzduchu, který lze vyrobit i přímo na pracovišti. Nevýhodou je větší omezení řezané tloušťky materiálu a horší kvalita řezné plochy. [20], [22]

4.4 Laserové plyny

CO₂ lasery jsou nejvíce rozšířenými lasery pro zpracování materiálů v průmyslové praxi. Pro zajištění svého spolehlivého provozu vyžadují zajištění dodávky značného množství vysoce kvalitních technických plynů, které se pro laserové technologie dělí na dvě skupiny: [7]

- **Laserové – rezonátorové plyny** (plyny pro generování paprsku v rezonátoru plynového laseru),
- **Technologické – asistenční plyny** (aktivní plyny pro řezání, případně ochranné atmosféry).

4.4.1 Rezonátorové plyny

Použití těchto plynů vyžaduje jejich vysokou čistotu, která je nezbytnou podmínkou pro efektivitu procesu přeměny elektrické energie na laserové záření v rezonátoru. Plyn, který ke své činnosti potřebují plynové lasery, je směsí plynů ve složení 60-85 % helia, 13-55 % dusíku a 1-9 % oxidu uhličitého. Avšak přesné složení závisí na druhu laseru a konkrétním výrobcu. Většina plynů se pro CO₂ lasery dodává v jednotlivých lahvích, přičemž jejich směšování probíhá až přímo v laseru, ale existují i lasery zásobované z lahví s premixovanou směsí plynů. Obzvláště velký důraz je kladen na množství nečistot (vodní vlhkost a uhlovodíky) obsažených v laserových plynech, které má obrovský dopad na snížení výstupního výkonu zvýšení nestability elektrického výboje v rezonátoru, zvýšení spotřeby laserových plynů a nákladů na opravy. [20], [22]

4.4.2 Technologické – asistenční plyny

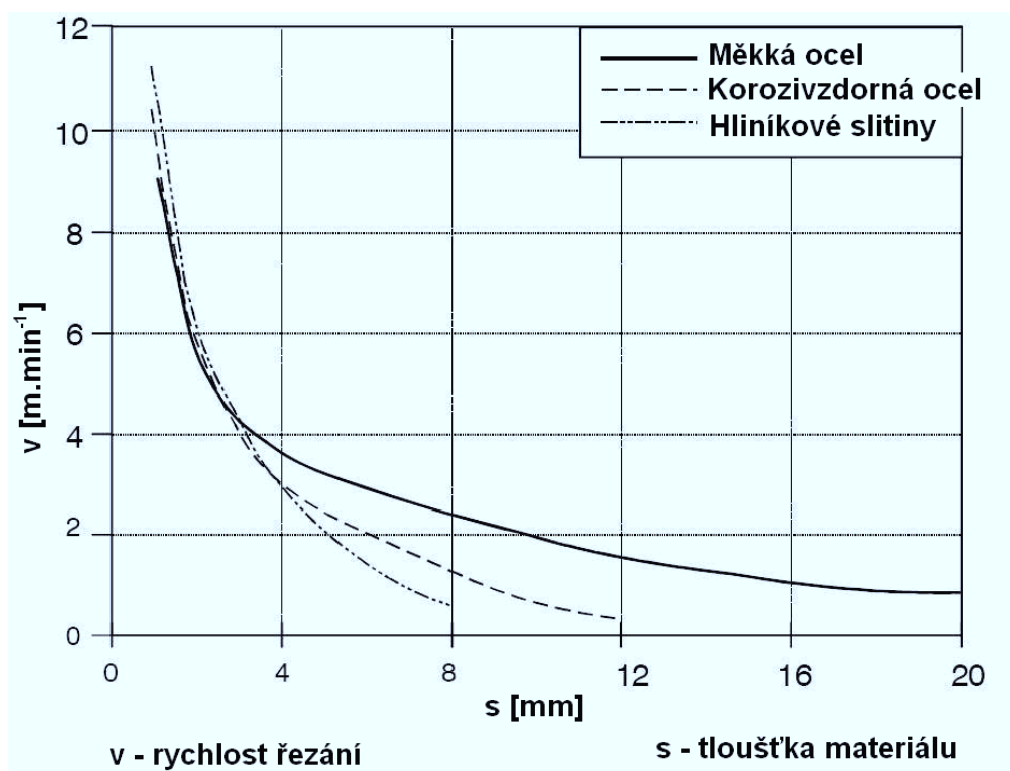
Tyto plyny se v místě dopadu paprsku na obrobek podílejí na vlastním technologickém zpracování materiálu. Druh, čistota i množství plynů závisí na použité technologii a zpracovávaném materiálu. Proto se používají různé plyny pro řezání, svařování, tepelné zpracování aj. Ve většině průmyslových aplikací využívajících laserové řezání se přivádí proud asistenčního plynu (dusík, kyslík) koaxiálně s laserovým svazkem. Plyn proudí do místa řezu pod vysokým tlakem výstupní řezací tryskou a umožňuje odstranění taveniny, oxidů a výparů z místa řezu. Vzdálenost řezací trysky od povrchu materiálu je velmi malá (do 1 mm) a je sledována kapacitním nebo dotykovým čidlem. Plynná ochranná atmosféra se používá pro ochranu zpracovávaného materiálu před okolní atmosférou nebo i pro oxidační reakci na podporu spalování. Pro aplikace svařování či vytváření povrchových vrstev se využívají inertní plyny (argon, helium a N_2). [20], [22]

- **kyslík** má největší zastoupení jako řezný plyn při řezání nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Kyslík chemicky reaguje s řezaným materiálem (exotermická reakce) a zajišťuje tak vyšší řezné rychlosti ve srovnání s dusíkem. Pro dosažení vysoké produktivity a kvality řezání je vhodné využít pro řezání laserem vysoké čistoty řezacího kyslíku (min. 99,95 %). Tlak kyslíku pro tenké materiály (1-3 mm) je okolo 0,5 MPa, pro silnější materiály (nad 10 mm) je zpravidla nastaven na hodnotu pod 0,1 MPa.
- **dusík** se používá k řezání vysoce legovaných včetně korozivzdorných ocelí, hliníku a jeho slitin. Dusík při řezání nereaguje s řezaným materiálem, chybí tedy tepelný účinek chemické reakce a řezná rychlost je tedy ve srovnání s rychlostmi při řezání kyslíkem mnohem nižší. Pro dosažení minimálního chemického ovlivnění řezaného materiálu a kvalitních řezných hran s minimem okují je vhodné jako řezný plyn využít dusík vysoké čistoty (min. 99,999 %). Během řezání nedochází k oxidaci materiálu což má vliv na zachování korozivzdornosti u korozivzdorných materiálů. Tlak dusíku je mnohem vyšší (nad 1 MPa) než při řezání kyslíkem.
- **argon** je pro řezání vysoce reaktivních kovů jako jsou titan a zirkonium, kdy je nutné použít zcela inertního plynu, který s řezaným kovem nebude chemicky reagovat a zároveň chránit řezné plochy před účinky okolního vzduchu. Argon se dodává v lahvích nebo svazcích a jeho spotřeba se pohybuje od 30 do 150 l.min⁻¹.

4.5 Parametry laserového řezání

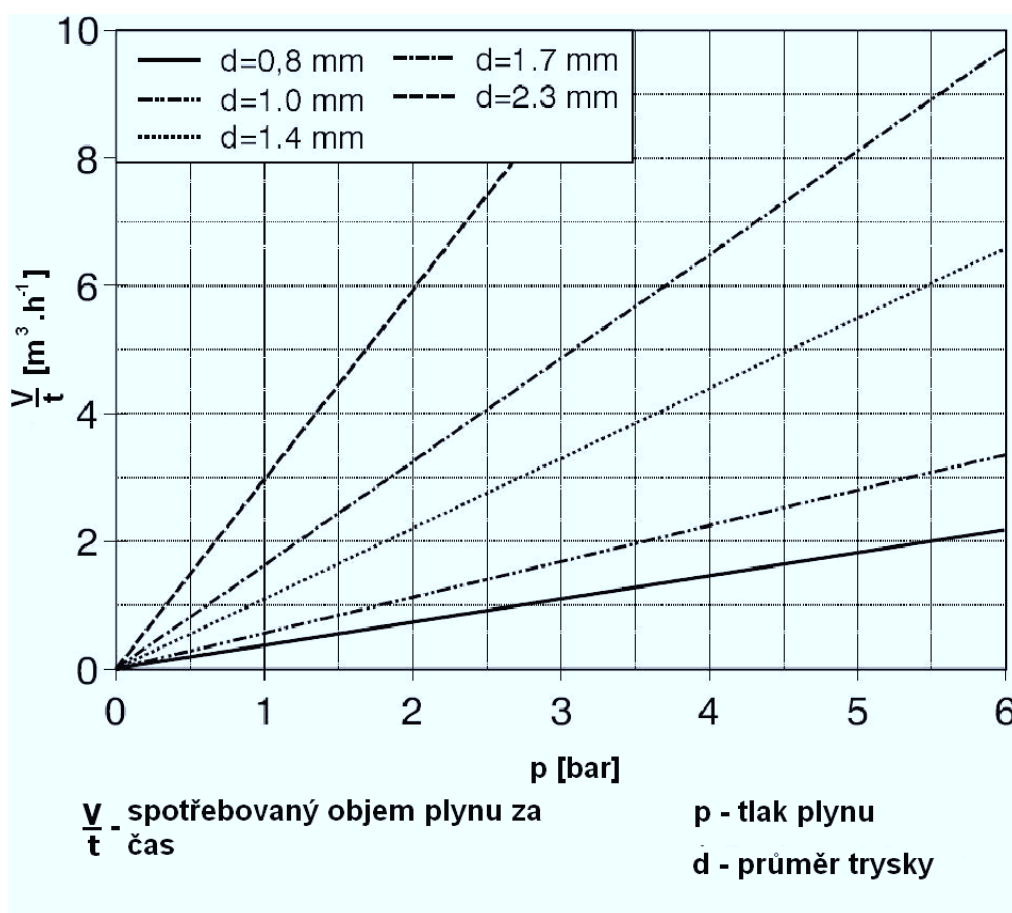
Laserová technologie dělení materiálů přináší hlavní výhodu v rychlosti, kvalitě a přesnosti výpalků ve srovnání s dalšími metodami dělení. Avšak neustále zůstává snaha najít způsob, jak zvýšit efektivitu procesu řezání. Parametry, které mají vliv na řezný proces jsou: výkon laserového paprsku, transparence fokusační optiky, ohnisková vzdálenost optiky, poloha ohniska ve vztahu k povrchové ploše obrobku, řezná rychlost, odstup trysky od plechu. Proces řezání dále ovlivňují parametry řezného plynu jako druh plynu a jeho čistota, pracovní tlak, průměr a geometrie tvaru trysky. [10], [21], [22]

- **řezací rychlost** laseru je definovaná jako relativní rychlost mezi nástrojem (řezacím hořákem) a zpracovávaným kusem. Stejně jako výkon laseru, musí být i rychlost řezání přizpůsobena druhu materiálu a jeho tloušťce. Špatně zvolená rychlost řezání může vést k vysoké drsnosti, otřepům a k nekvalitnímu řezu. S vyšší rychlosti řezání roste přibližně lineárně potřebný výkon laseru.



Obr. 4.8 Graf rychlosti CO₂ laseru s výkonem 4 kW [21]

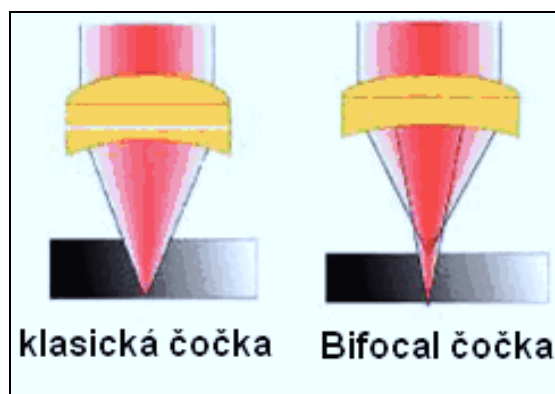
- **tlak plynu a geometrie tvaru trysky** ovlivňují kvalitu řezu, drsnost povrchu řezné plochy a tvorbu otřepů. Tlak plynu se při nízkotlakém řezání pohybuje do 0,1 MPa (nízkotlaké), do 0,5 MPa (středotlaké) a do 2 Mpa (vysokotlaké). Vzdálenost trysky od materiálu musí být co možno nejmenší, aby plyn optimálně pracoval v řezné drážce. Konvenční trysky mají kruhový, kuželovitě se rozšiřující otvor, který se běžně v praxi pohybuje mezi 1 - 2,5 mm. Spotřeba řezného plynu závisí na tlaku plynu a velikosti výstupního průměru trysky. Čím větší je tlak plynu a velikost průměru trysky, tím je větší spotřeba plynu.



Obr. 4.9 Graf spotřeby kyslíku při řezání [21]

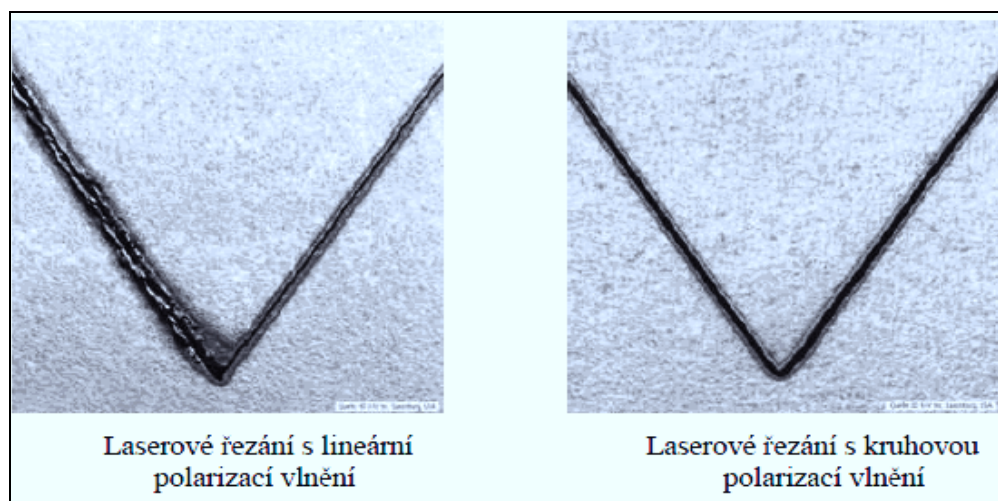
- **druh a čistota použitého asistenčního plynu** ovlivňuje tloušťku řezné spáry a rychlost řezání. Při použití dusíku jako asistenčního plynu dochází ke snížení rychlosti řezání a maximální řezatelné tloušťky. Toto snížení je částečně možné kompenzovat zvýšeným tlakem asistenčního plynu (dusíku) nebo využitím možnosti zvýšení parametrů použitím systému Bifocal.

Systém Bifocal pracuje na základě speciální patentované dvouohniskové optiky, která nahrazuje použití standardních jednoohniskových čoček (ZnSe). Tato čočka rozdělí laserový svazek na dvě ohniska, kdy je jedno s větším úhlem ostroty zaostřené na povrch materiálu a druhé s menším úhlem ostroty zaostřené do vnitřku materiálu. Tento systém lze aplikovat téměř na všechny běžné řezací lasery. Umožňuje řezání větších tloušťek při stejném výkonu, vyšší rychlost při stejné tloušťce, usnadnění propalů, kvalitní řez bez strusky a optimalizaci spotřeby asistenčního plynu. [10]



Obr. 4.10 Laserová optika [10]

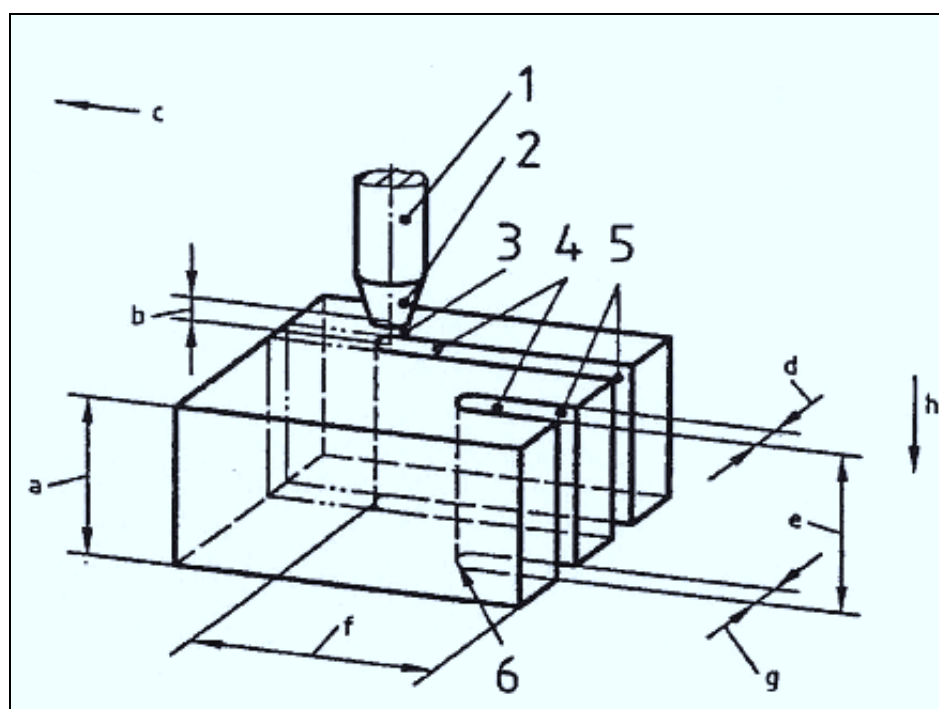
- provádíme-li řezání s lineárně polarizovaným laserovým paprskem, tak výsledky kvality řezné hrany závisí na směru řezání. Pokud směr pohybu řezání odpovídá směru polarizace vlnění, tak je řez kvalitní a bez otřepů. U této polarizace můžeme docílit extrémně vysokých řezných rychlostí. Je-li směr polarizace vlnění kolmý na směr řezání, tak je hrana řezu nekvalitní s otřepy. Lineárně polarizované laserové záření je vhodné pouze pro aplikace, u kterých je směr řezu totožný se směrem polarizace.



Obr. 4.11 Vliv polarizace na řeznou hranu [21]

4.6 Kvalita povrchu v místě řezu

U laserového řezání nelze měnit kvalitu řezu v různých stupních nastavením řezacích parametrů. Vždy je nutno nastavit optimální řezné parametry a tím dosáhnout optimální kvality řezu. Klasifikace a vyhodnocení kvality tepelných řezů probíhá dle normy ČSN EN ISO 9013, která je českou verzí evropské normy EN ISO 9013:2002. Tato mezinárodní norma se používá pro materiály vhodné pro řezy laserem od 0,5 do 40 mm a zahrnuje geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti povrchu řezu, který dosahuje R_a 3,6 až 12 μm a tloušťky tepelně ovlivněné oblasti od 0,05 do 0,2 mm. [32]



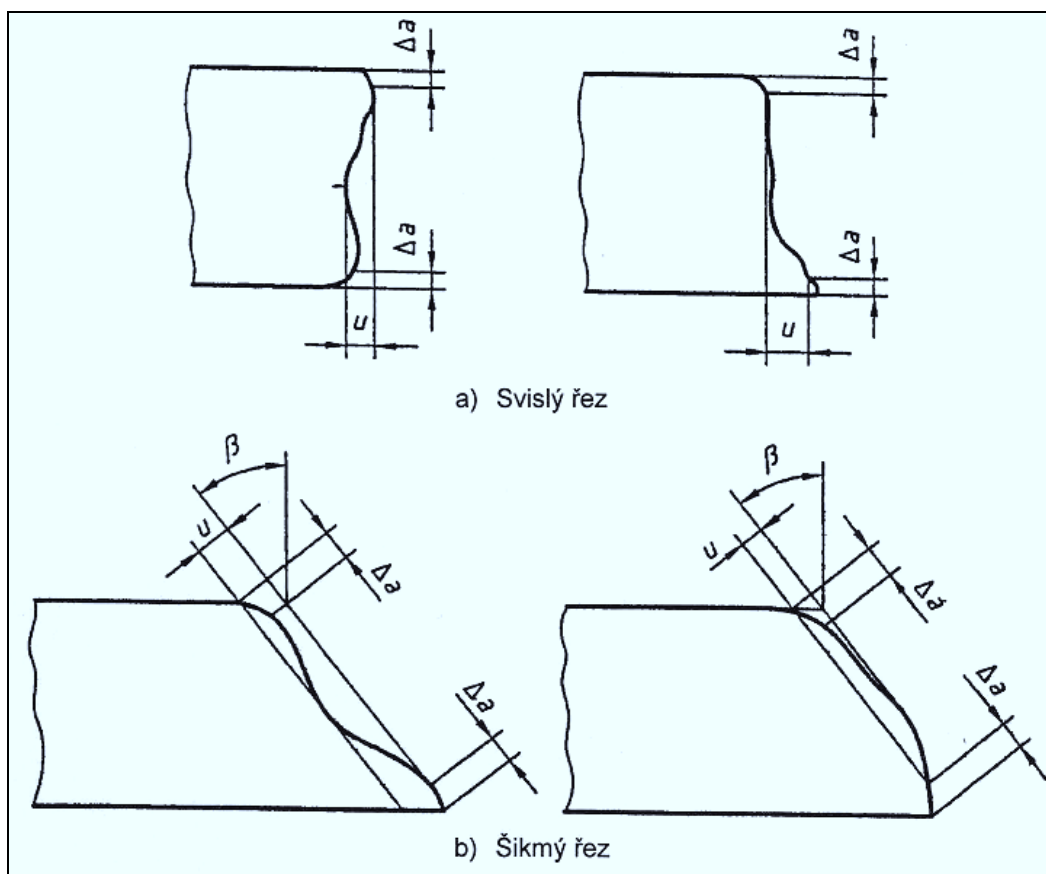
Obr. 4.12 Termíny vztahující se k procesu řezání [32]

Vysvětlivky:

- | | |
|-----------------|--------------------------------------|
| 1) Řezací hořák | a) Tloušťka zpracovávaného kusu |
| 2) Hořák | b) Vzdálenost trysky |
| 3) Svazek | c) Směr posunu |
| 4) Řezná spára | d) Šířka řezné spáry |
| 5) Počátek řezu | e) Řezná tloušťka |
| 6) Konec řezu | f) Délka řezu |
| | g) Šířka řezné spáry na spodní ploše |
| | h) Směr řezání |

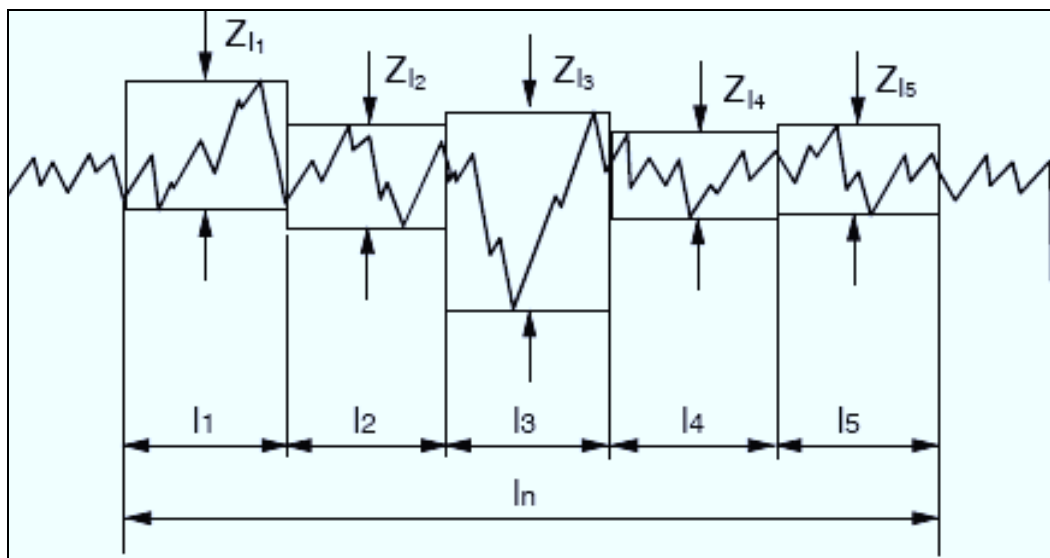
Kvalita výpalku vedle rozměrových úchylek jednoznačně identifikuje jakost povrchu řezu. Charakteristickými veličinami určující kvalitu povrchu řezu tepelně dělených materiálu dle ČSN EN ISO 9013 jsou např.: [32]

- **úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu** - „ u “ jedná se o vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými přímkami (dotýkajícími se řezného povrchu), mezi které je vepsán profil povrchu řezu. Tyto přímky svírají s povrchem řezaného materiálu určený úhel (90° u svislých řezů). Pro posouzení úchylky kolmosti je rozhodující její nejvyšší naměřená hodnota v pouze omezené oblasti povrchu řezu. Při laserovém řezání je dosaženo nejmenšího úkosu ze všech tepelných metod dělení materiálů. Opět se projevuje závislost na tloušťce materiálu.



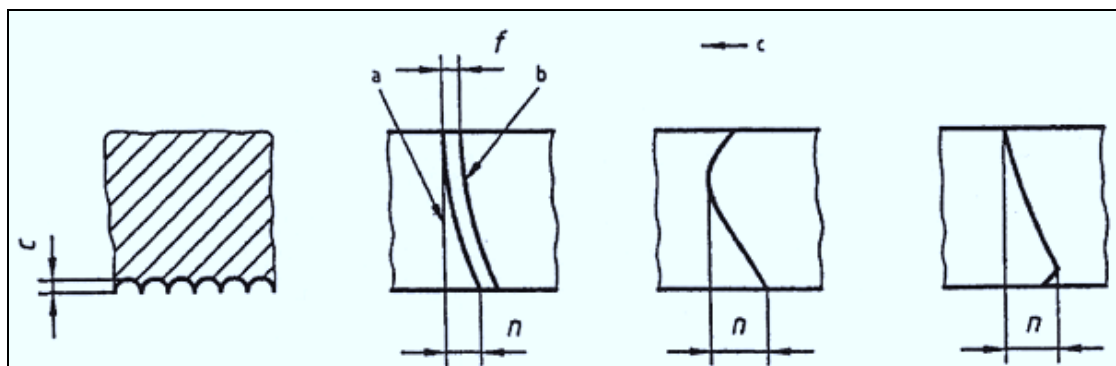
Obr. 4.13 Úchylka kolmosti nebo úchylky úhlů [32]

- **průměrná výška prvků profilu – „Rz5“** je aritmetický průměr z jednotlivých výšek prvků profilu na pěti za sebou následujících základních délkách.



Obr. 4.14 Průměrná výška prvků profilu [32]

- **skluz – „n“** je to průmět vzdálenosti mezi dvěma body rýhy ve směru řezání. Čím je rychlost řezání vyšší, tím silněji se drážky zalamují proti směru řezání.



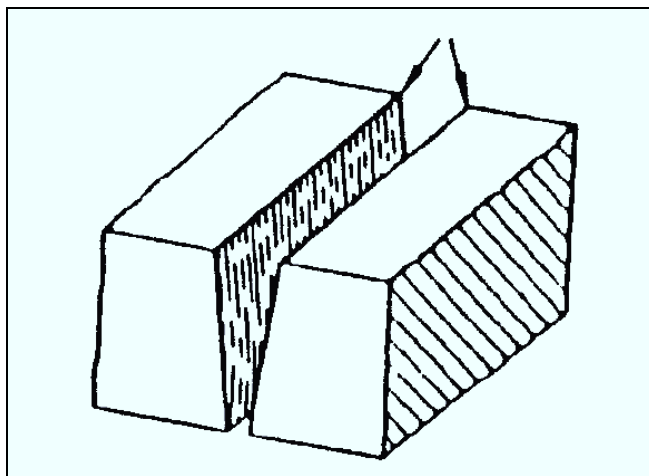
Obr. 4.15 Skluzová rýha [32]

(a - referenční přímka, b - skluzová rýha, c - směr posuvu)

4.7 Vady při řezání laserem

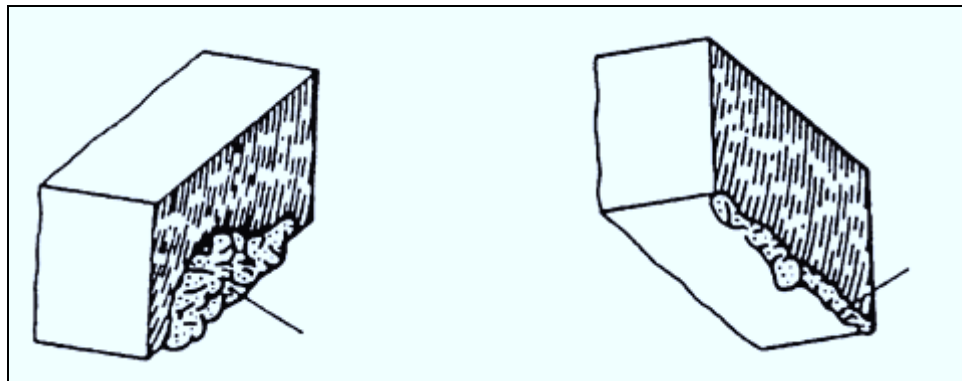
Jedním z významných faktorů, který ovlivňuje kritérium jakosti materiálů a jejich výrobků jsou přítomné geometrické vady, vzniklé při výrobě degradací nastavených parametrů technologie nebo působením degradačních činitelů (teplota, napětí, koroze). Vadami obecně rozumíme nepravidelnosti nebo úchytky od stanoveného tvaru, polohy řezů a vlastností předepsaných technickými normami. Norma ČSN EN 12584, která je českou verzí evropské normy EN 12584:1999, definující termíny možných vad řezů provedených laserem, které jsou způsobeny v přímé souvislosti s řezáním. [33]

- **rozšíření spáry řezu na jednu nebo na obě strany** ovlivňuje především rychlost posuvu. Je-li posuv příliš rychlý oblouk se nestíhá natáhnout až ke spodní hraně a horní části řezu je odevzdáváno více tepla. To způsobuje širokou spáru na horním okraji a zkosení řezné spáry do tvaru V. Naopak při příliš nízké rychlosti dochází k přebytku vneseného tepla do materiálu, zejména u spodní hrany. Výsledkem je příliš široká spára, ještě rozšířená v dolní části a široká tepelně ovlivněná oblast.



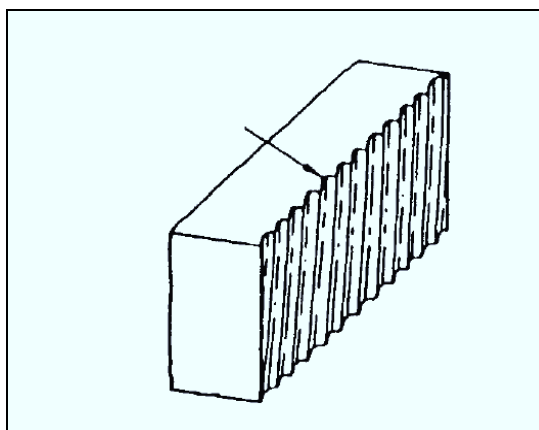
Obr. 4.16 Rozšíření spáry řezu [33]

- **ulpívající struska** se vyskytuje na dolní hraně řezu nebo na ploše řezu, obvykle však ve spodní oblasti plochy. Její množství lze částečně ovlivnit nastavením parametrů řezání,



Obr. 4.17 Ulpívající struska [33]

- **nadměrná hloubka řezné spáry,**



Obr. 4.18 Nadměrná hloubka řezné spáry [33]

- **mikrotrhlina** vzniká vlivem ochlazování nebo napětí, obvykle je pozorovatelná pouze pod mikroskopem.

5. Vlastní experiment

Experimentální část a její průběh je zadán firmou Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. Podstatou tohoto experimentu je vyhodnocení přesnosti obrábění, velikosti přetavené vrstvy a tepelně ovlivněné zóny základního materiálu v závislosti na výkonových parametrech laseru. Při realizaci části této práce v podmínkách firmy Honeywell byl pro nařezání vzorků poskytnut zkušební materiál Haynes 188 a laserový obráběcí stroj Winbro Delta. Druhá část práce probíhala v podmínkách akreditované laboratoře nacházející se v areálu VŠB – TU OSTRAVA a spočívala v přípravě zkušebních vzorků pro metalografickou analýzu a jejich vyhodnocení dle normy ČSN EN ISO 9013 a ČSN EN 12584.

5.1 Zkušební materiál

Superslitina Haynes 188 je slitina kobaltu obsahující velké množství niklu, chromu a wolframu. Tato slitina kombinuje vysokoteplotní pevnost s velmi dobrou odolností vůči oxidaci (až 1095 °C). Haynes 188 má také dobrou odolnost vůči sulfidaci a vyznačuje se oproti předchozím slitinám lepší tepelnou a metalurgickou stabilitou. Slitina se může tvářet za tepla i za studena a ponechává si dobrou tvárnost i po dlouhodobém vystavení zvýšeným teplotám. Haynes 188 je snadno svařitelná všemi konvenčními metodami, ale díky své pevnosti, nízké tepelné vodivosti a abrazivnosti není snadné slitinu obrábět. Při obrábění má totiž tendenci ztvrdnout, čímž se zvýší pevnost a „gumovitost“ slitiny. Vzhledem ke svým vynikajícím vlastnostem splňuje HS 188 požadavky aplikací v leteckých plynových turbínách určené pro vojenské a civilní využití. Slitina se používá na spalovací komory, plamence, trysky a vložky v proudových motorech u letadel F-15 a F-16, boeingu 767, 777 a dalších. [27]

Tab. 5.1 Fyzikální a mechanické vlastnosti slitiny HS 188 [27]

hustota [g.cm ⁻²]	teplota tavení [°C]	modul pružnosti [GPa]	mez pevnosti Rm [MPa]	mez kluzu Re [MPa]	tažnost [%]
8,98	1315-1410	232	945	465	53

Tab. 5.2 Chemické složení slitiny HS 188 [27]

Co [%]	Ni [%]	Cr [%]	W [%]	Fe [%]	Mn [%]	Si [%]	C [%]	La [%]	B [%]
39*	22	22	14	3*	1,25	0,35	0,1	0,03	0,015*

* - maximum

5.2 Použitý laserový systém

Systém Delta lze nakonfigurovat až se čtyřmi různými typy laserových zdrojů tak, aby byly splněny požadavky pro konkrétní aplikace laserové technologie (řezání, vrtání, svařování). Při použití zdroje Rofin DC 020 se z Winbro Delta stává plynový CO₂ laser pracující v kontinuálním režimu. 5-ti osý systém umožňuje výrobu složitých dílů s přesností 0,015 mm a opakovatelností 0,010 mm. Z praktických důvodů je zdroj umístěn přímo na laserovém stroji. CO₂ plyn je čerpán z plynové láhve, která je zabudovaná do boxu zdroje. [28]



Obr. 5.1 Laserový stroj Winbro Delta [28]

Technické funkce stroje Winbro Delta: [28]

- řídicí systém Heidenhaim iTNC 530 a Pc řídicí systém,
- kapacitní snímání výšky,
- kontaktní sondování,
- rychlá změna systému trysky,
- havarijní systém ochrany,
- integrace CAM softwaru,
- 3D řezání.



Obr. 5.2 Laserový zdroj ROFIN DC 020 [29]

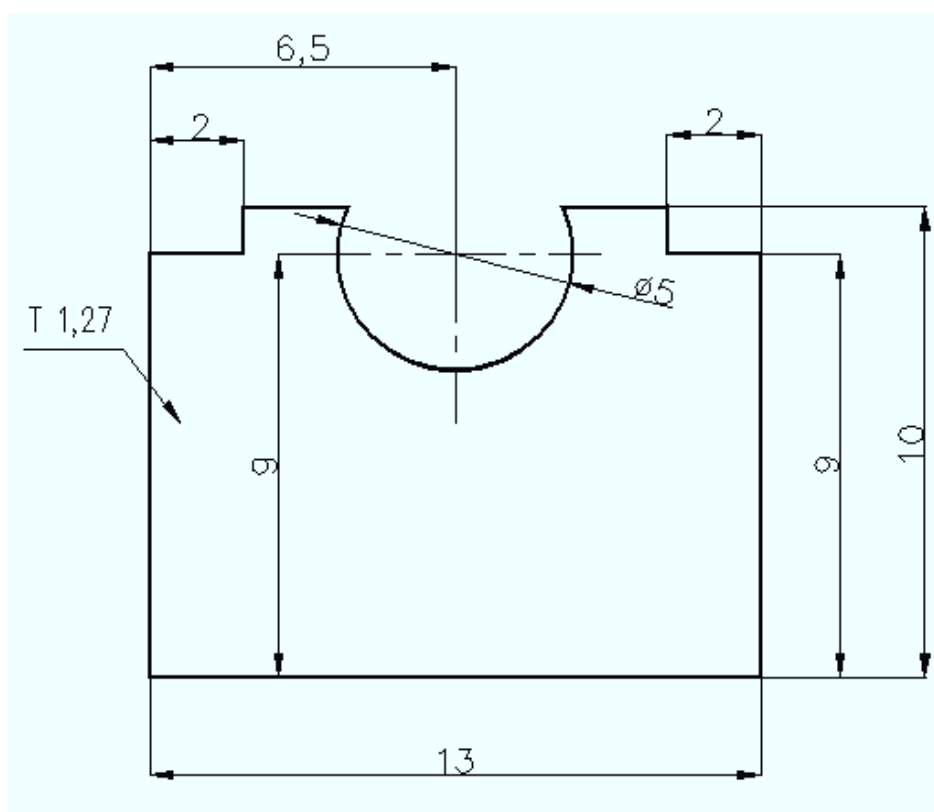
Technické parametry zdroje Rofin DC 020: [29]

- výstupní výkon 2000 W,
- rozsah výkonu 200 až 2000 W,
- kvalita svazku $K = 0,95$ [-].

5.3 Průběh experimentu

5.3.1 Laserové řezání vzorků

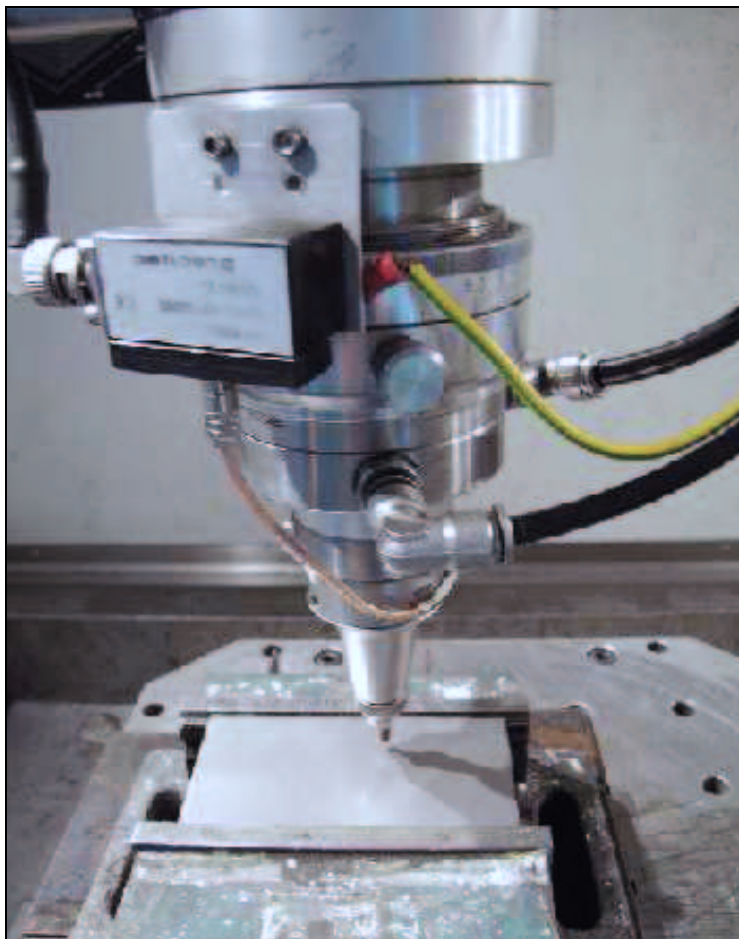
Výchozím bodem experimentu je nakreslení tvaru a nadefinování řezných drah zkušebnímu vzorku v programu, který spolupracuje s řídicím systémem laseru. Pomocí tohoto programu je řízen pohyb laserové řezací hlavy v průběhu obrábění. Při tvorbě samotného programu je důležité vhodně naprogramovat umístění zápalu (počátku řezu). Ten má z hlediska dosažené kvality řezu a dodržení výrobních tolerancí velký význam. Jeho umístění nesmí zasahovat do trajektorie řezu, proto je v našem případě umístěn do místa, které se následně stává odpadem. Pro nařezání zkušebních vzorků byl použit plech z již zmíněné slitiny o tloušťce 1,27 mm.



Obr. 5.3 Tvar a rozměry zkušebnímu vzorku

Řezání zkušebních vzorků bylo ovlivněno na základě určitých nastavení výkonových parametrů laseru. Jedná se o parametry řezání, konkrétně velikost výstupního výkonu laseru a rychlost posuvu, které se během řezání postupně měnily podle potřeby a dosažené kvality řezu. Ta je přitom ovlivněna nejen nastavením výstupního výkonu a rychlosti posuvu, ale i na použití asistenčního plynu, vzdálenosti trysky od povrchu materiálu a na poloze ohniska v průběhu řezání. Pro experiment byl jako asistenční plyn použit dusík

o vysoké čistotě, který je dodáván z hlavního rozvodu pod konstantním tlakem 1,2 MPa. Vzdálenost trysky se při řezání zkušebních vzorků nacházela ve vzdálenosti 0,9 mm od povrchu obrobku a relativní poloha ohniska 1 mm pod jeho povrchem. Jednalo se tedy o tavný způsob řezání laserem.



Obr. 5.4 Průběh řezání zkušebních vzorků

Pro vytvoření vzorku č. 1 byly použity parametry výstupního výkonu a rychlosti posuvu laseru, které jsou pro řezání daného materiálu obvyklé. Řez prvního vzorku tedy proběhl jedním přejezdem laseru při hodnotě výstupního výkonu 600 W a rychlosti posuvu $700 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Po domluvě s operátorem bylo rozhodnuto, že pro další průběh experimentu bude využita v plném rozsahu kapacita použitého laserového systému. Postupně tak byl zvyšován výkon stroje a podle potřeby měněna rychlost posuvu řezání. Z důvodu zvyšující se rychlosti řezání v průběhu experimentu se na spodní straně zkušebních vzorků začalo objevovat stále větší množství napálené strusky. Ta se tvořila ve formě otřepu, který se následně musí ze zhotovených dílců odstranit, což má negativní vliv na produktivitu práce. Naopak při vysokých hodnotách výstupního výkonu a malé rychlosti

posuvu řezání docházelo v místě řezu ke vzniku značně ovlivněné tepelné oblasti, což mělo vliv na jeho výslednou kvalitu. Jelikož pro nás není velikost a množství napálené strusky hodnotícím parametrem, volili jsme s rostoucím výstupním výkonem vždy vyšší řeznou rychlost. Tímto způsobem tak bylo postupně vytvořeno 34 vzorků, které se následně staly předmětem dalšího zpracování.

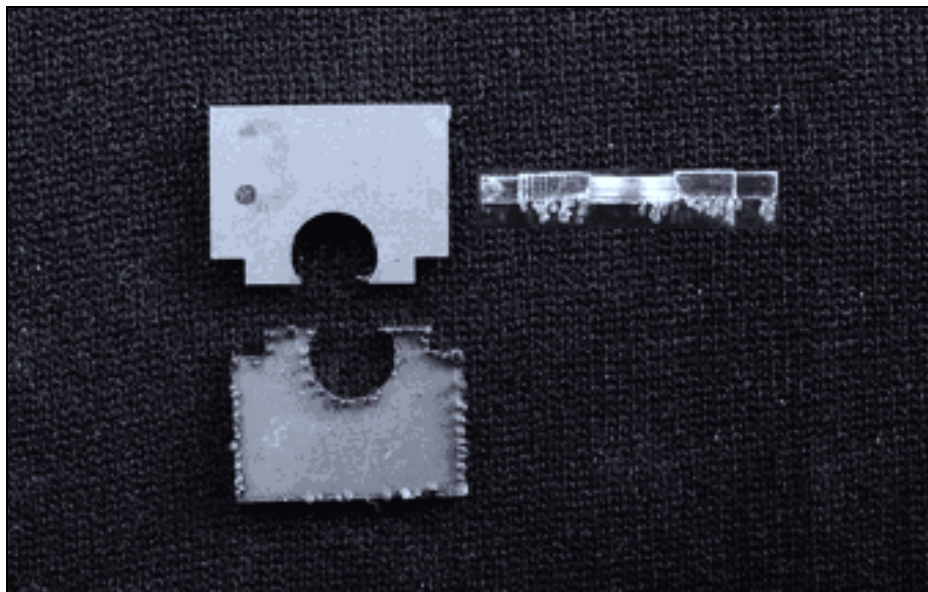


Obr. 5.5 Vyřezané vzorky

5.3.2 Metalografická analýza

Metalografie se zabývá pozorování a zkoumáním vnitřní stavby kovů a slitin. Jejím cílem je zviditelnění struktury a následné studium pomocí optického mikroskopu. Pro určení mikrostruktury základního materiálu a hlavně mikrostruktury v místě řezu je důležitá příprava metalografických vzorků. Ta spočívá v odebrání vzorku, jejich preparaci, broušení, leštění a leptání. Přitom se musí dodržovat určitá pravidla, která mají zajistit, aby se struktura vzorku v průběhu přípravy nezměnila a nebyla jednotlivými operacemi ovlivněna. [30]

- **odběr vzorku** se z hlediska volby místa řídí především účelem pozorování, heterogenitou materiálu s ohledem na postup výroby, tvar a rozměry součástí. Při oddělování materiálu nesmí dojít k tepelnému ani mechanickému ovlivnění struktury. Vzorky pro experiment mají připravenou plochu (výbrus) pomocí laseru, proto z nich není nutno provádět odběr.



Obr. 5.6 Zkušební vzorek pro metalografickou analýzu

- **preparace vzorku** slouží k usnadnění manipulace pro další etapy přípravy. K tomu aby se dosáhlo rovinné plochy výbrusu, byly dané vzorky zality prostřednictvím vytvrditelné syntetické pryskyřice – preparace za studena. Tato pryskyřice (dentakryl) byla připravena z prášku a technické kapaliny ve směšovacím poměru 2:1. Jelikož měla směs tendenci rychle tvrdnout, bylo nutné ji v připravené kádince neustále míchat. Vzorky byly umístěny do držáků ve formě pružin a zality směsí pryskyřice do předem připravených forem. K tomu bylo použito zařízení CitoVac pro vakuovou impregnaci od firmy Struers. Po zalití se nechala směs syntetické pryskyřice se vzorky 12 hodin tvrdnout. Po uplynutí této doby a odstranění formy byly vzorky připraveny pro další kroky metalografického výbrusu.



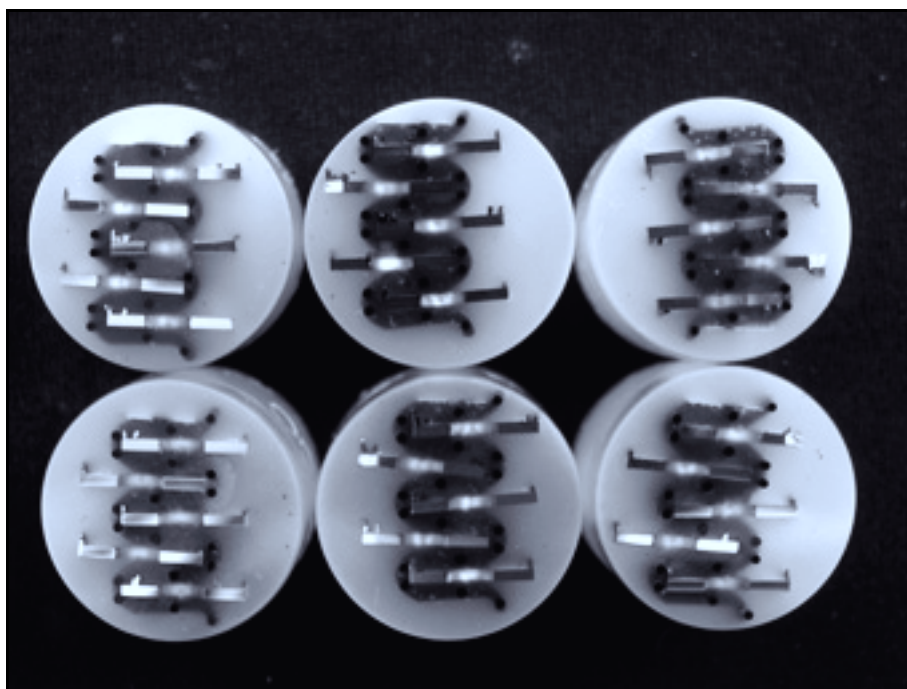
Obr. 5.7 Zařízení pro vakuovou impregnaci [30]

- **broušením** vzorků dochází ke snižování povrchových nerovností řezu. Přitom byla použita sada metalografických brusných papírů s tenkou vrstvou brusiva (karbid křemíku) a pojiva. Pro rovinné broušení byly použity brusné papíry o velikosti brusného zrna 80, 160, 320. Tyto relativně hrubé částice poskytovaly vysoký a rychlý úběr materiálu. Brusné papíry s vyšší zrnitostí 640, 1200, 2400 byly použity pro jemné broušení. Snahou bylo odstranit deformace po předchozích úpravách a vytvořit tak povrch, který je vhodný pro leštění. Vzorek je při broušení přitlačován na vodorovnou plochu rotujícího kotouče s brusným papírem a ochlazován proudem kapaliny (vody), aby se odplavil odbroušený materiál. Při každé výměně brusného papíru za jemnější bylo potřeba vzorek očistit (technickým lihem) a pootočit o 90° aby nedocházelo k úběru materiálu pouze jedním směrem. Pro dosažení co nejlepší rovinné plochy vzorků broušením a leštěním bylo použito speciální rotační zařízení TegraSystem také od firmy Struers.
- **leštěním** bylo u vzorků dosaženo rovinného povrchu a též zrcadlového lesku. Nejčastěji se tak děje odstraňováním povrchových mikronerovností zahlazováním (mechanické leštění). Nejdříve se na rotačním zařízení vyměnil brusný kotouč za kotouč leštící. Použito bylo diamantové sukno typu MD-Mol zrnitosti 3 μm a diamantová leštící suspenze DP. Při leštění se vzorek opět vystavuje působení tlaku na rotující kotouč s leštícím materiálem. Tím dochází v tenké povrchové vrstvě k intenzivní plastické deformaci a vzniku Beilbyho vrstvy. Vyleštěný povrch tak není obvykle vhodný k pozorování.



Obr. 5.8 Zařízení pro broušení a leštění vzorků [30]

- **leptání** je chemický proces, který se používá pro zviditelnění jednotlivých strukturních součástí. Abychom mohli pozorovat u vzorků jejich strukturu, bylo nutné odstranit vzniklou B-vrstvu po mechanickém broušení a leštění. Leptání vzorků bylo provedeno ponořením do vybraného leptacího činidla – Vilella (1 díl kys. dusičné, 3 díly kys. solné, 2 díly glycerinu). Vlivem rozpouštěcí schopnosti jednotlivých strukturních součástek bylo dosaženo vzniku povrchového reliéfu a zviditelnění jednotlivých zrn (leptání na hranice zrn). Po naleptání bylo ještě nutné vzorky důkladně opláchnout a osušit.



Obr. 5.9 Připravené zkušební vzorky

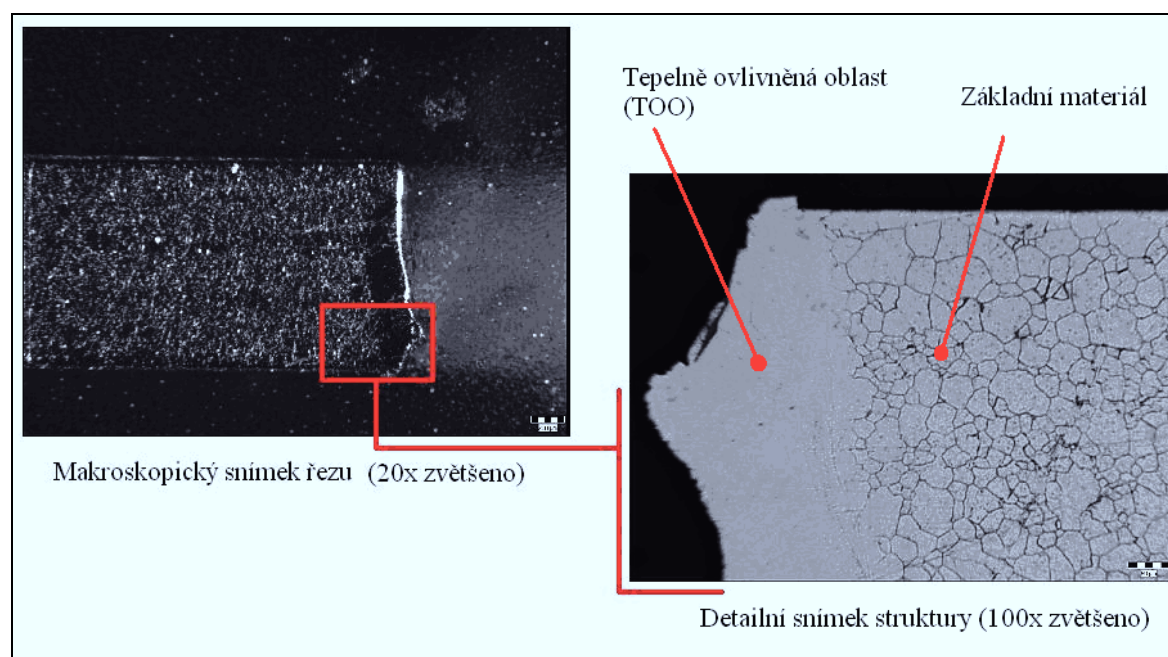
- **pozorování světelným mikroskopem** je klasickou metodou pro studium struktury materiálu. Pozorování bylo zaměřeno hlavně na parametry, které jsou určeny zadavatelem. K tomu byl využit světelný mikroskop ZEISS NEOPHOT 21. Jedná se o vertikální metalografický mikroskop na němž se provádí pozorování zdola. Vzorek byl umístěn nad objektiv, čímž je zajištěná kolmá poloha pozorované plochy k optické ose. Zobrazení jednotlivých strukturních součástek nastává při odrazu různě intenzivních světelných paprsků. K zaostření této struktury se používá vertikální pohyb pracovního stolku mikroskopu.

5.4 Vyhodnocení

Metalografické hodnocení laserového řezu vycházelo nejprve z hodnocení makroskopického a následně mikroskopického. Podstatou je nalezení vhodných výkonových parametrů laseru při obrábění slitiny HS 188. Po nařezání zkušebních vzorků a jejich metalografické analýze měly právě tyto parametry největší vliv na kvalitu řezné hrany. Snahou bylo dosáhnout co nejkvalitnější řezné plochy při různé kombinaci výstupního výkonu a rychlosti posuvu s ohledem na plné využití potenciálu laseru. Z důvodu velkého počtu nařezaných vzorků a množství zpracovaných dat při vyhodnocení, byly na základě vizuální kontroly kvality řezu vybrány vzorky, které prezentují rozsah pracovních parametrů laseru viz tabulky.

Tab. 5.3 Řezné parametry pro vzorek č. 1

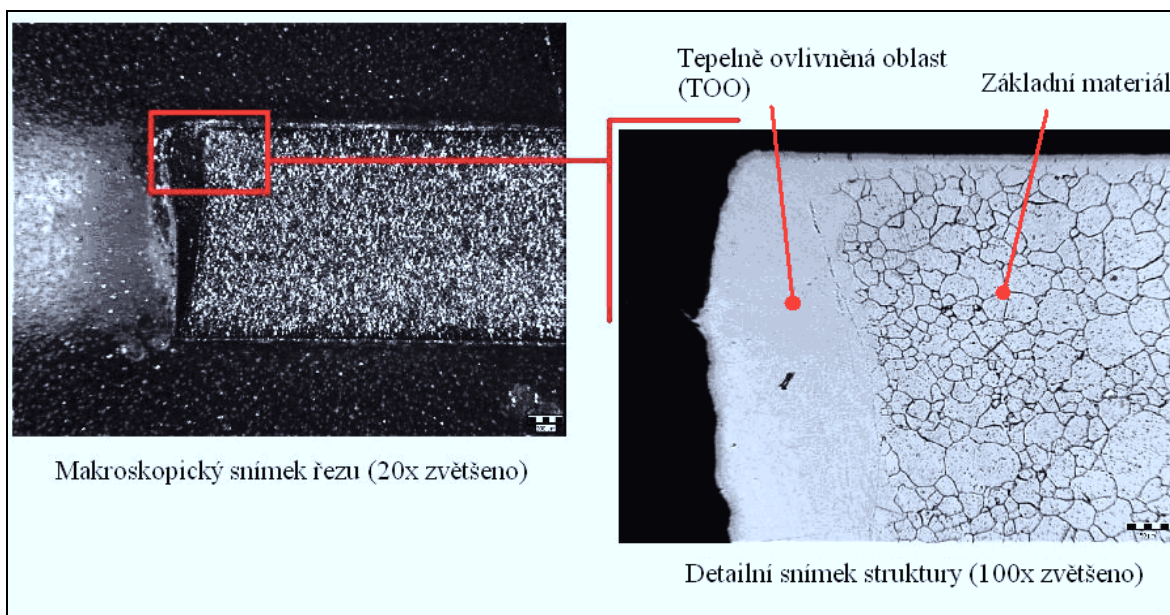
Vzorek č.	Výkonové parametry stroje	
1.	výstupní výkon [W]	600
	rychlost posuvu [mm.min ⁻¹]	700
	budící frekvence zdroje [Hz]	5000
	Procesní parametry stroje	
	vzdálenost trysky [mm]	0,9
	tlak asistenčního plynu [MPa]	1,2
	poloha ohniska [mm]	1,9



Obr. 5.10 Řez vzorku č. 1

Tab. 5.4 Řezné parametry pro vzorek č. 2

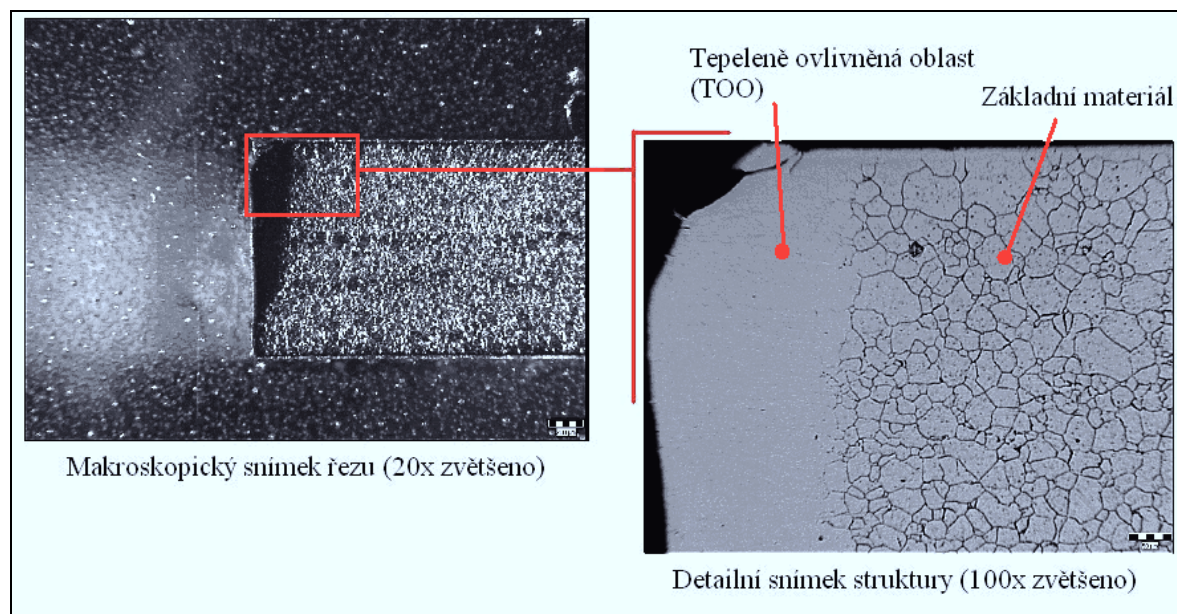
Vzorek č.	Výkonové parametry stroje	
2.	výstupní výkon [W]	800
	rychlost posuvu [mm.min ⁻¹]	3000
	budící frekvence zdroje [Hz]	5000
	Procesní parametry stroje	
	vzdálenost trysky [mm]	0,9
	tlak asistenčního plynu [MPa]	1,2
	poloha ohniska [mm]	1,9



Obr. 5.11 Řez vzorku č. 2

Tab. 5.5 Řezné parametry pro vzorek č. 3

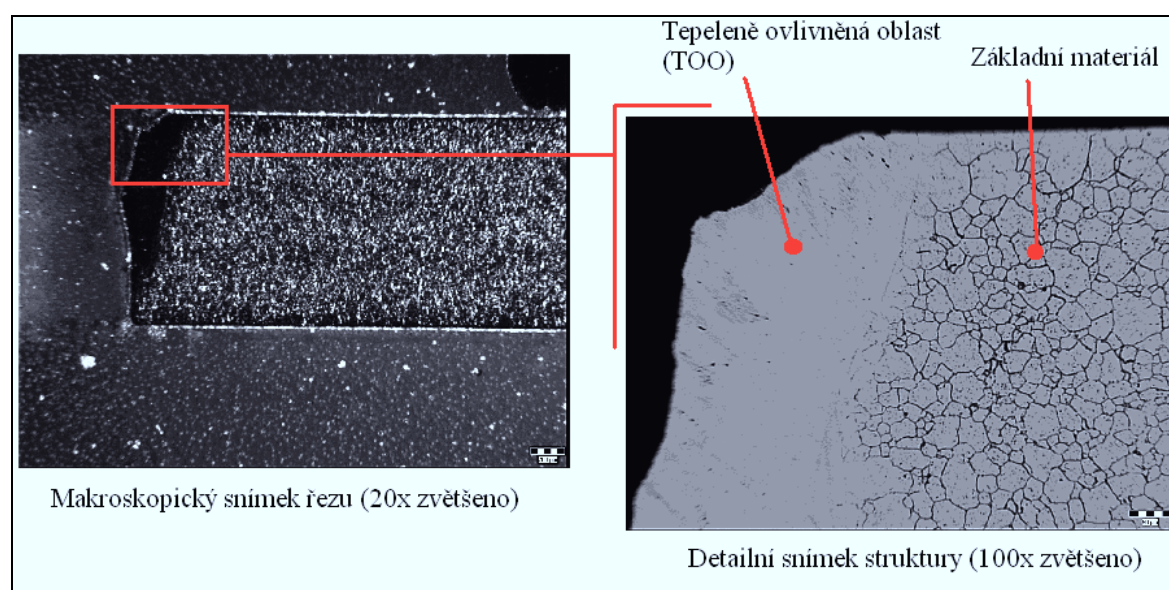
Vzorek č.	Výkonové parametry stroje	
3.	výstupní výkon [W]	1800
	rychlost posuvu [mm.min ⁻¹]	1000
	budící frekvence zdroje [Hz]	5000
	Procesní parametry stroje	
	vzdálenost trysky [mm]	0,9
	tlak asistenčního plynu [MPa]	1,2
	poloha ohniska [mm]	1,9



Obr. 5.12 Řez vzorku č. 3

Tab. 5.6 Řezné parametry pro vzorek č. 4

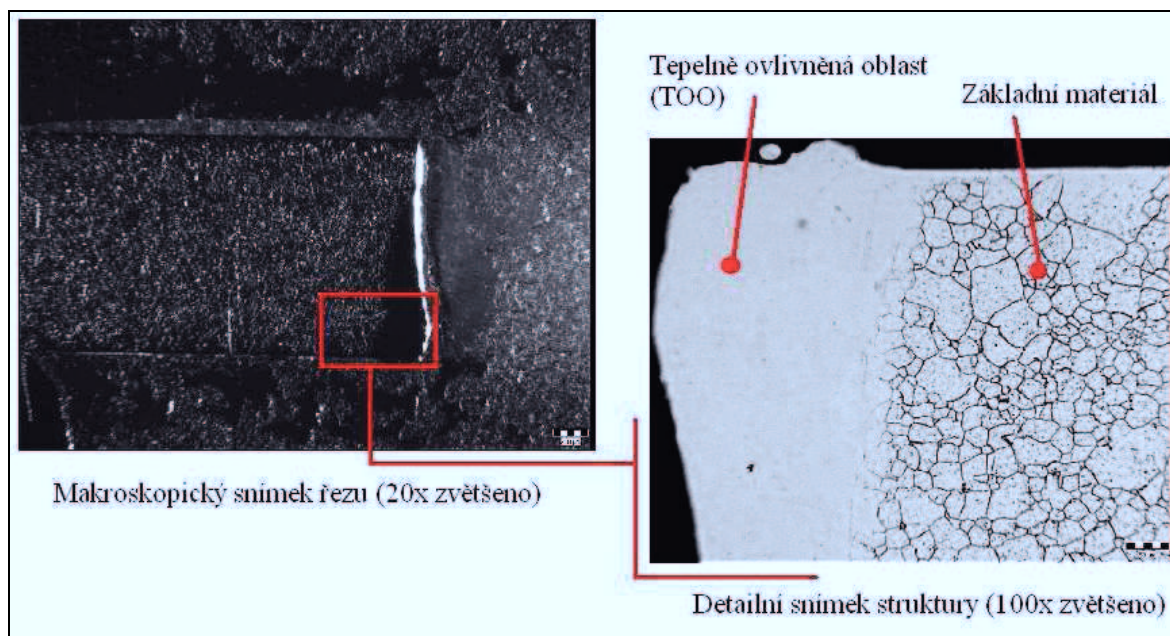
Vzorek č.	Výkonové parametry stroje	
4.	výstupní výkon [W]	1800
	rychlost posuvu [mm.min ⁻¹]	3000
	budící frekvence zdroje [Hz]	5000
	Procesní parametry stroje	
	vzdálenost trysky [mm]	0,9
	tlak asistenčního plynu [MPa]	1,2
	poloha ohniska [mm]	1,9



Obr. 5.13 Řez vzorku č. 4

Tab. 5.7 Řezné parametry pro vzorek č. 5

Vzorek č.	Výkonové parametry stroje	
	Procesní parametry stroje	
5.	výstupní výkon [W]	1800
	rychlost posuvu [mm.min ⁻¹]	5000
	budící frekvence zdroje [Hz]	5000
	Procesní parametry stroje	
	vzdálenost trysky [mm]	0,9
	tlak asistenčního plynu [MPa]	1,2
	poloha ohniska [mm]	1,9



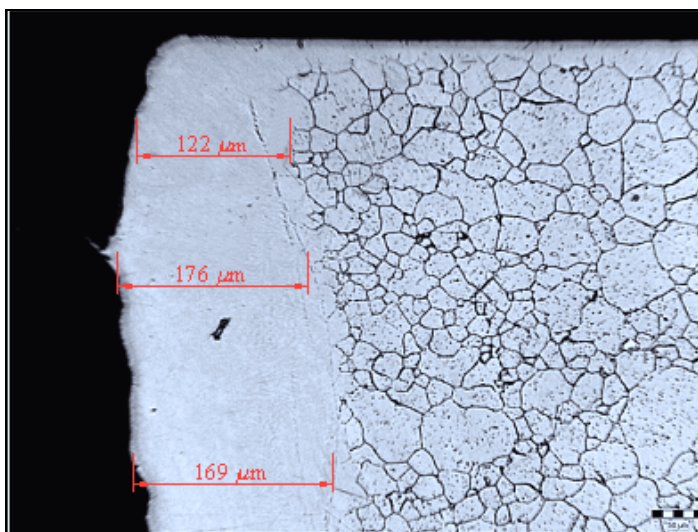
Obr. 5.14 Řez vzorku č. 5

Už při kontrole pouhým okem byla u vzorků zjištěna velikost a množství napálené strusky. Ulpívající struska se nacházela na všech řezech místy ve střední a hlavně na spodní části plochy řezu. Vyskytovala se ve formě velmi tenké vrstvy oxidů (otřep), která vznikla profukováním taveniny z řezu asistenčním plynem a následným chladnutím taveniny.

5.4.1 Makroskopické vyhodnocení vzorků

Účelem je stanovit makroskopický charakter řezné plochy, a to prohlídkou několikanásobně (20x) zvětšených vzorků. Při dosažení zřetelné kvality plochy řezu lze vyhodnotit přetavená vrstva (na snímcích nelze vidět, ale vyskytuje se vždy při tepelném dělení materiálu), tepelně ovlivněná oblast, možné otřepy, trhliny a jiné vady. Pro vyhodnocení bylo třeba zjistit rozsah možného tepelného ovlivnění materiálu v oblasti

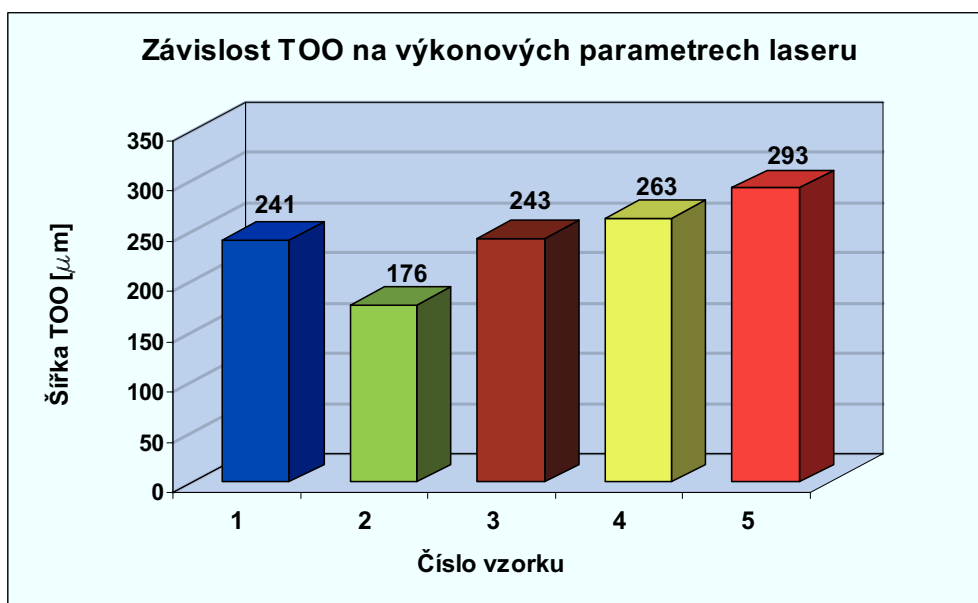
laserového řezu. Rozsahy šířky tepelně ovlivněné oblasti (TOO) jsou podle teoretického předpokladu závislé na řezných parametrech stroje, především na rychlosti posuvu laserového svazku. Proto byla šířka TOO zkoumána v závislosti na této veličině. Sledování probíhalo na plochách kolmých k rovině řezu. Nejblíže k rovině řezu se vyskytuje tenká přetavená vrstva na niž navazuje TOO. Obě tyto vrstvy vznikly krátkým, ale velmi intenzivním působením tepelné energie laserového svazku. Přetavená vrstva a TOO se v určitých směrech vyznačují změnou struktury a vlastností materiálu, proto jsou nežádoucí. Může dojít k zakalení doprovázené zvýšením tvrdosti a křehkosti, vzniku trhlin. Při volbě vhodných parametrů lze velikost přetavené vrstvy a TOO do jisté míry ovlivnit, avšak zcela zabránit jejich vzniku nelze. Zvyšování rychlosti posuvu při řezání by mělo zaručit, že se základní materiál v místě řezu nestačí prohřát. Tedy celkové množství vneseného tepla do místa řezu bude menší a tím i menší TOO. Jelikož šířka TOO je u všech řezů nepravidelná byly u jednotlivých vzorků vybrány místa, kde došlo k největšímu tepelnému ovlivnění materiálu. Větších hodnot bylo dosaženo vždy v horní části řezu, kde byla následně změřena její šířka viz obr. 5.15.



Obr. 5.15 Šířka TOO u vzorku č. 2

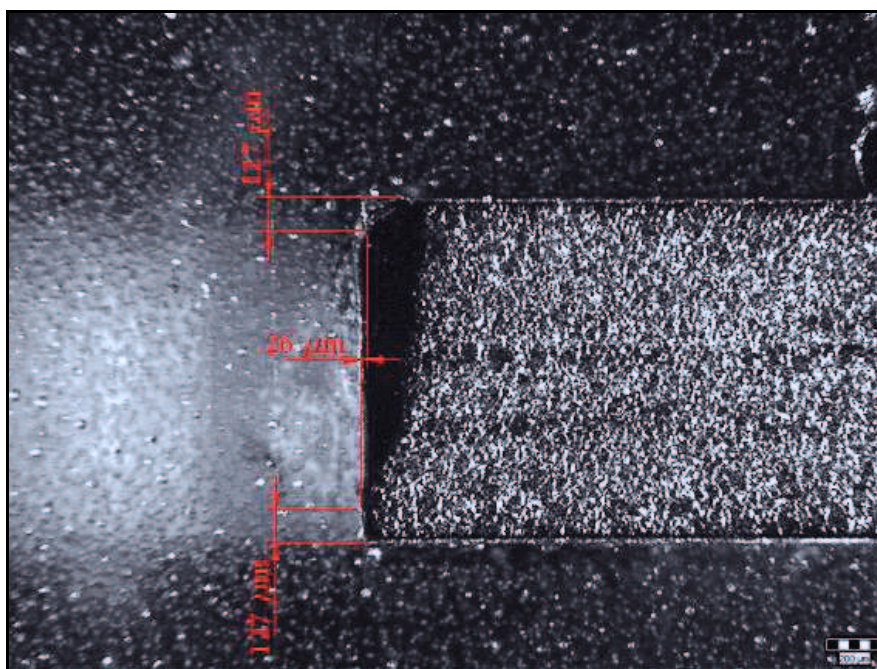
Naměřené šířky TOO se u vzorků pohybují od 122 do 293 μm . Nejmenší TOO, kde maximální hodnota šířky nepřekročila 176 μm , byla dosažena u vzorku č. 2, jehož řez byl proveden výstupním výkonem 800 W a rychlostí posuvu 3000 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Naopak k největšímu tepelnému ovlivnění materiálu došlo u vzorku č. 5, kde výstupní výkon činil 1800 W a rychlost posuvu 5000 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Přestože pro vyhodnocení bylo použito pouze pět vzorků, průběh experimentu prokázal nepřímou závislost šířky TOO na rychlosti

posuvu viz obr. 5.16. Lze konstatovat, že při použití kontinuálního CO₂ laseru je míra tepelného ovlivnění materiálu závislá nejen na rychlosti posuvu, ale na více činitelích.



Obr. 5.16 Grafické znázornění šířek TOO

Společně se šířkou TOO byla u jednotlivých vzorků změřena úchylka kolmosti. Pro určení její velikosti bylo potřeba nejdříve stanovit parametr Δa , jehož velikost je uvedena v závislosti na tloušťce řezaného materiálu. Měření úchylky kolmosti proběhlo dle normy ČSN EN ISO 9013. Nejmenší dosaženou úchylkou kolmosti 26 μm disponoval vzorek č. 3 viz obr. 5.17 s řeznými parametry o výkonu 1800 W a rychlostí 1000 mm.min⁻¹.



Obr. 5.17 Měření úchylky kolmosti

Příslušná velikost úchylky pak zařadí daný řez do tolerančního pole (1 až 5), čímž je dán stupeň kvality řezu. Řez vzorku č. 3 odpovídá tolerančnímu poli 1-nejvyšší stupeň kvality. Tvar a kvalita laserového řezu jsou obvykle spojeny i s jeho pórovitostí a vznikem trhlin vlivem tepelného příkonu. U zkoušených vzorků nebyl na základě metalografického vyhodnocení zjištěn výskyt trhlin. Z experimentu tedy vyplývá, že při vhodně zvolené kombinaci výkonových parametrů laseru lze dosáhnout velmi dobrých výsledků jak kvality řezné plochy, tak šířky TOO.

Pro použití laserem řezaných plechových dílů v leteckém průmyslu byly firmou Honeywell stanoveny maximální dovolené hodnoty vyhodnocovaných veličin. Tyto hodnoty jsou dány normou, kterou z licenčním podmínkami nelze uvést. Přesto byly dosažené hodnoty porovnány s předepsanými a provedeno zhodnocení viz tab. 5.8.

Tab. 5.8 Zhodnocení

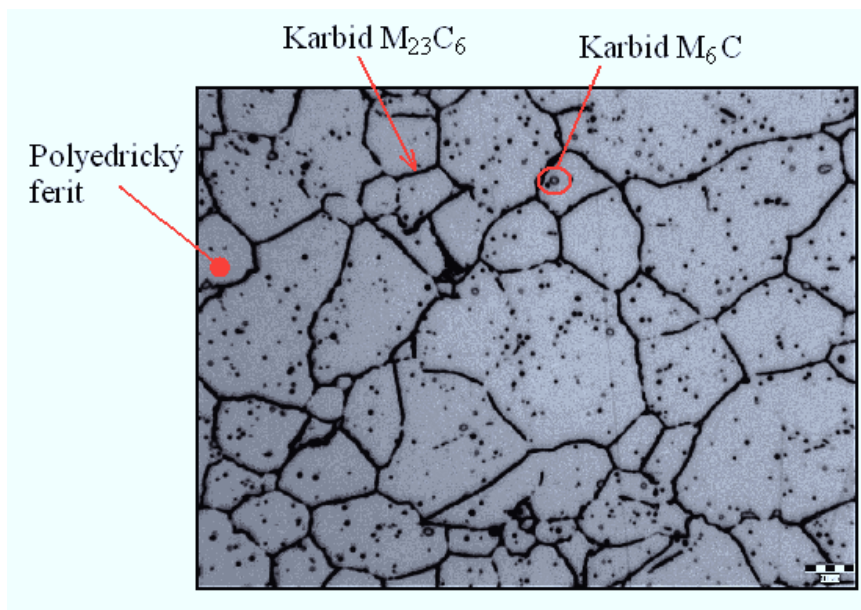
Vyhodnocované veličiny	Dosažené hodnoty	Hodnocení
Průměrná šířka TOO	0,122 – 0,293 mm	Vyhovuje
Velikost úchylky kolmosti	0,026 – 0,149 mm	Vyhovuje (vzorek.č. 2,3,5) Nevyhovuje (vzorek č. 1,4)
Mikrotrhliny do základního materiálu	0	Vyhovuje

U některých vzorků byly hodnoty šířky TOO překročeny, avšak jsou stále vyhovující, protože průměrná šířka TOO se měří po celé délce řezu. V našem případě byly hodnoty šířky TOO získány v místě, kde došlo k největšímu tepelnému ovlivnění materiálu.

5.4.2 Mikroskopické vyhodnocení vzorků

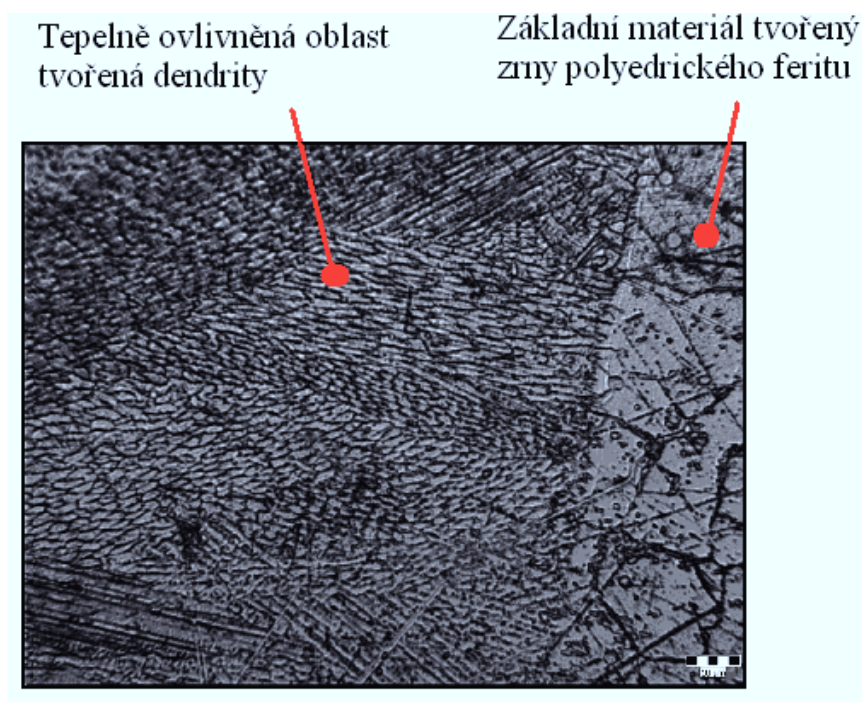
Při hodnocení metalografických změn tepelně děleného materiálu byla v oblasti laserového řezů pozorována mikrostruktura. Použitím stejného materiálu, technologie a podmínek při řezání, vzniká předpoklad, že vybrané vzorky mají stejnou, nebo velmi podobnou mikrostrukturu materiálu. Z toho důvodu byla pozorována mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu pouze u jednoho vzorku. Při jeho zvětšení (500x) byla pozorována jednotlivá zrna materiálu, hranice zrn a strukturní složky materiálu. Mikrostruktura základního materiálu je tvořena maticí γ (FCC mřížka) – bílá

zrna polyedrického feritu, sekundárními karbidy typu $M_{23}C_6$ (na bázi Cr, Mo a W) a M_6C (Mo, W), které tvoří matici γ' a dalšími fázemi viz obr. 5.18.



Obr. 5.18 Mikrostruktura základního materiálu (500x zvětšeno)

Výsledná struktura v místě tepelně ovlivněného materiálu je závislá především na průběhu ochlazování. Na obr. 5.19 lze pozorovat přechod mezi mikrostrukturou základního materiálu a tepelně ovlivněnou oblastí. Vlivem tepelného příkonu došlo ke zjemnění struktury tvořené pravidelně uspořádanými dendrity.



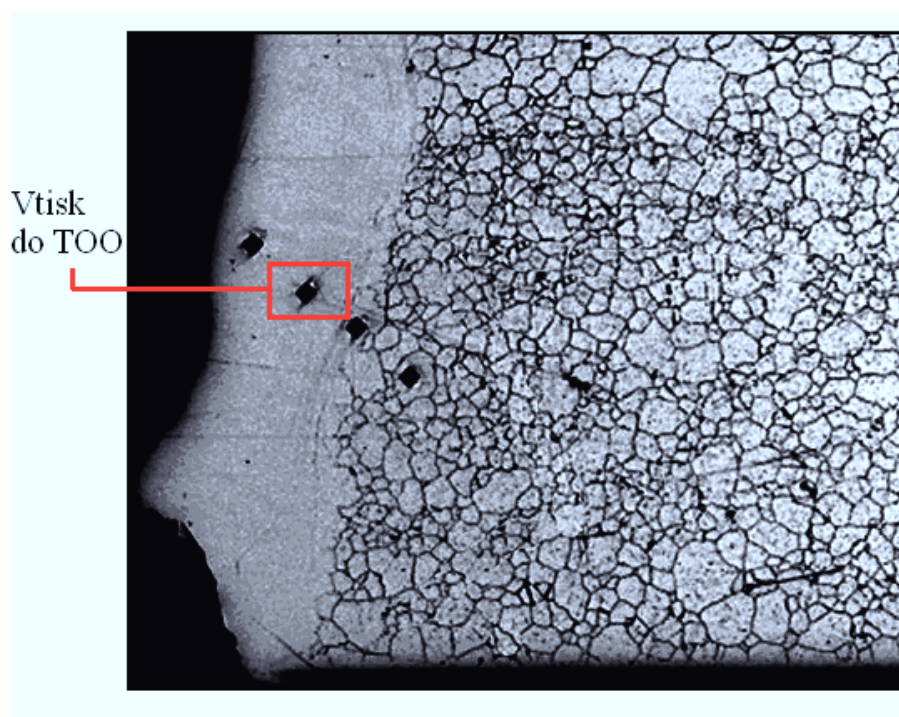
Obr. 5.19 Mikrostruktura TOO (500x zvětšeno)

5.4.3 Měření mikrotvrdosti

Pro zjištění případných změn vlastností řezaného materiálu proběhlo měření tvrdosti jednotlivých strukturních složek. Mikrotvrdost dle Vickerse byla měřena za stejného předpokladu jako při pozorování mikrostruktury u jednoho vzorku. Při měření byl indentor vtlačován do materiálu pod zkušebním zatížením 100 g, které působí v kolmém směru po dobu 13 s. Měření bylo provedeno na hranici řezu, v TOO a základním materiálu. Z dosažených hodnot viz tab. 5.9 je zřejmé, že v oblasti řezu nedošlo vlivem tepelného ovlivnění k zásadní změně mikrotvrdosti materiálu.

Tab. 5.9 Měření mikrotvrdosti u vzorku č. 3

Oblast měření	Hranice řezu	TOO	Hranice TOO a zákl. mat.	Základní materiál
Dosažené hodnoty	306 HV 0,1	308 HV 0,1	306 HV 0,1	304 HV 0,1



Obr. 5.20 Mikrotvrdost u vzorku č. 3

Závěr

Diplomové práce byla zaměřena na využití nekonvenční technologie v obrábění. Její použití se celosvětově dlouhodobě zvyšuje a zdokonaluje. Důvodem jsou stále větší požadavky na kvalitu, životnost a přesnost výroby, která vyžaduje nové aplikace obráběných materiálů. U těchto tzv. speciálních slitin dochází k výraznému poklesu jejich obrobitelnosti, proto v mnoha případech nahrazují nekonvenční technologie obrábění klasické třískové obrábění. Laserová technologie patří v současné době k nejprogresivnějším technologiím a v oblasti strojírenství zažívá za poslední dobu neuvěřitelného rozmachu.

Práce zahrnuje problematiku tepelného dělení materiálů a možnost praktického využití laserového řezání. Tato metoda obrábění je vhodná především do kusové nebo malosériové výroby, kde dosahuje dobrých výsledků a je pro uživatele atraktivní díky technicko – ekonomickým aspektům výroby. Laserovým řezáním vznikají velmi přesné výpalky nejen kovových materiálů, které v mnoha případech nevyžadují žádné dokončovací operace. Limitujícím faktorem pro řezání laserem je především tloušťka řezaného materiálu. Z důvodů odstranění problémů, které mohou mít vliv na výslednou kvalitu řezů, techniku nebo celkovou ekonomiku výroby, je potřeba zabývat se výzkumem technologických parametrů, kterými lze proces řezání do jisté míry ovlivnit.

Diplomová práce se nezabývá pouze známými skutečnostmi, ale snaží se taky v rámci možností stanovit vliv technologických parametrů, zejména výstupního výkonu a rychlosti posuvu na kvalitu řezné plochy. Pozornost byla věnována také metalografické analýze zkušebních vzorků a jejich vyhodnocení. Sledována byla šířka tepelného ovlivnění materiálu, kde nebyla prokázána přímá závislost na řezné rychlosti, velikost úchylnosti kolmosti, výskyt trhlin a změna mikrostruktury materiálu. Na základě provedených pozorování bylo zjištěno, že rychlost posuvu řezání je relativní veličina, závislá na požadavcích technologie výroby. To znamená, že například řezná rychlost, při které je dosaženo nejmenší hodnoty šířky tepelného ovlivněného materiálu, nevyhovuje z hlediska drsnosti a vzhledu řezné plochy. Z experimentu tedy vyplývá, že při vhodně zvolené kombinaci výkonových parametrů laseru lze dosáhnout velmi dobrých výsledků jak kvality řezné plochy, tak velikosti tepelně ovlivněné oblasti.

Seznam použité literatury

- [1] BENKO, B., et al. *Laserové technologie*. 1.vyd. Bratislava: STU Bratislava, 2000. 122 s. ISBN 80-227-1425-9.
- [2] MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technologie*, Technická univerzita Košice, Strojnícká fakulta, Košice, Edícia vedeckej a odbornej literatúry, Viena, 2000, 270 s, ISBN 80-7099-430-4.
- [3] ŘASA, J.; JINDROVÁ, R. Lasery, laserové technologie a stroje s laserem. MM Průmyslové spektrum. 20006, č. 7, s. 34. ISSN 1212-2572
- [4] ŘASA, J.; KEREČANINOVÁ, Z. *Nekonvenční metody obrábění – 4. díl*, MM Průmyslové spektrum. 2008, č. 3, s. 80-82. ISSN 1212-2572.
- [5] ŘASA, J.; KEREČANINOVÁ, Z. *Nekonvenční metody obrábění – 5. díl*, MM Průmyslové spektrum. 2008, č. 5, s. 68-72. ISSN 1212-2572.
- [6] CHMELÍČKOVÁ, H. *Laserové technologie v praxi*. UP Olomouc, Přírodovědecká fakulta, Olomouc, 2010. 30 s. [cit. 2011-03-07]. Dostupné z WWW: <<http://ufyz.sgo.cz/show-file/74/>>.
- [7] JANATA, M. *Průmyslové lasery a jejich aplikace* [online]. AIR PRODUCTS s.r.o. [cit. 2011-05-01]. Dostupný z WWW: <http://www.airproducts.cz/metalfabrication/svarovani/pdf/Lasery_clanek_MJ.pdf>.
- [8] ROUBÍČEK, M. *Kritéria volby metody a trendy tepelného dělení materiálů*. [online]. [cit. 2011-04-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/roubicek49122.pdf>>.
- [9] ŠULC, J. *Lasery a jejich aplikace*. [online]. 2002 [cit. 2011-03-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>>.
- [10] CHUDÍK, I. *Možnosti zvýšení výkonu laserového dělení materiálů*. MM Průmyslové spektrum. 2010, č. 9, s. 100. [online]. [cit. 2011-04-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/moznosti-zvyseni-vykonu-laseroveho-deleni-materialu>>.
- [11] ŠULC, J. *Průmyslové aplikace laserových systémů*. [online]. 2004 [cit. 2011-03-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>>.
- [12] ČEZ [online]. 2010 [cit. 2011-02-05]. *Lasery kolem nás*. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/laser.htm>>.

- [13] *LaserArt* [online]. 2009 [cit. 2011-01-20]. Historie laseru. Dostupné z WWW: <http://www.laserart.wbs.cz/Historie_laseru.html>.
- [14] *Cs.wikipedia.org* [online]. 2011 [cit. 2011-04-11]. Laser. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>>.
- [15] *Cs.wikipedia.org* [online]. 2005 [cit. 2011-03-10]. Spontánní emise. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Spont%C3%A1nn%C3%AD_emise>.
- [16] *Cs.wikipedia.org* [online]. 2005 [cit. 2011-03-10]. Stimulovaná emise. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Stimulovan%C3%A1_emise>.
- [17] *Laser.wz.cz* [online]. 2010 [cit. 2011-03-12]. Laser. Dostupné z WWW: <<http://lasery.wz.cz/>>.
- [18] *National Ignitron Facility & Proton Science* [online]. 2009 [cit. 2011-02-10]. How lasers work. Dostupné z WWW: <https://lasers.llnl.gov/education/how_lasers_work.php>.
- [19] *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [cit. 2011-02-18]. Lasery. Dostupné z WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=775>>.
- [20] *Laserová technologie* [online]. LINDE GAS, a.s. 2006. [cit. 2011-03-22]. Dostupné z WWW: <http://www.linde-gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/nav_ind_las>.
- [21] *The laser as a tool : Technical information* [online]. TRUMPF GROUP 2007-02 [cit. 2011-02-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.trumpf.com/en/innovation/media-center/books/the-laser-as-a-tool/samplers.html>>.
- [22] ZATLOUKAL, P. *Laserové dělení materiálu*. Welding.cz. [online]. 2007. [cit. 2011-04-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.welding.cz/laser/deleni.htm>>.
- [23] *Leonardo technology*. [online]. 2005. [cit. 2011-02-14]. Lasery info learning. Dostupné z WWW: <http://www.lt.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=224&Itemid=215>.
- [24] *Maturita.cz*. [online]. 2005. [cit. 2011-02-14]. Zpracování materiálu pomocí laseru. Dostupné z WWW: <<http://www.maturita.cz/referaty/referat.asp?id=1358>>.
- [25] ROUBÍČEK, M. *Řezání CO₂ laserem*. Konstrukce [online]. 2009. [cit. 2011-04-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.konstrukce.cz/clanek/rezani-co2-laserem-opticky-system-bifocal/>>.
- [26] *Bystronic* [online]. 2007. [cit. 2011-03-20]. Technologie řezání. Dostupné z WWW: <http://www.bystronic.cz/cutting_and_bending/cz/cs/news/bystronic_in_press/index.php?navid=83&nl=2>.

- [27] *Haynes International, Inc.* [online]. 2001. [cit. 2011-04-03]. High-Temperature Alloys. Dostupné z WWW: <<http://www.haynesintl.com/pdf/h3001.pdf>>.
- [28] *Winbro Group Technologies* [online]. 2008. [cit. 2011-04-03]. Systems Delta. Dostupné z WWW: <<http://www.winbrogroupp.com/systems/delta.php>>.
- [29] *Rofin* [online]. 2011. [cit. 2011-05-02]. Výrobky. Dostupné z WWW: <<http://www.rofin.com/index.php?id=161&L=1>>.
- [30] *Struers* [online]. 2010. [cit. 2011-04-03]. Rofin DC Series. Dostupné z WWW: <http://www.struers.com/default.asp?top_id=3&doc_id=282>.
- [31] *HONEYWELL Aerospace Olomouc s.r.o.* [online]. [cit. 2011-01-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.honeywell.com/sites/cz/Letectvi.htm>>.
- [32] Norma ČSN EN ISO 9013 (05 3401), *Tepelné dělení – Klasifikace tepelných řezů – Geometrické požadavky na výrobky a úchylky jakosti řezu*, říjen 2003.
- [33] Norma ČSN EN 12584 (05 3402), *Vady při řezání kyslíkem, laserem, plasmou - Terminologie*, duben 2001.